



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE EXPERIMENTÁLNÍHO EXTRUDÉRU PRO
3D TISK MODELÁŘSKÉ HLÍNY**

MECHANICAL DESIGN OF EXPERIMENTAL EXTRUDER FOR 3D PRINTING OF INDUSTRIAL CLAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Žižlavský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Vít Žižlavský**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce experimentálního extrudéru pro 3D tisk modelářské hlíny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní výroba stavebních materiálů představuje poměrně nový směr využití principu spojování materiálu vrstvu po vrstvě. Technicky je potřeba zajistit výnos materiálu v požadovaném tvaru a kvalitě, což zajišťuje tisková hlava a extruder. Modelářská hlína je standardní materiál, který může simulovat podobné stavební hmoty a její zpracování je obecně známé. Extruze tohoto materiálu aditivním způsobem může urychlit tvorbu koncepčních modelů a uměleckých artefaktů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukce extrudéru pro 3D tisk modelářské hlíny. Předpokládá se 3D tisk uměleckých a designérských objektů malých rozměrů (do 0,4 x 0,4 x 0,4 m).

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikace procesních parametrů,
- návrh dvou konstrukčních variant,
- realizace zvolené varianty,
- tvorba výkresové dokumentace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

WILLMANN, Jan, Philippe BLOCK, Marco HUTTER, Kendra BYRNE a Tim SCHORK, ed. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018. Cham: Springer International Publishing, 2019. ISBN 978-3-319-92293-5.

REINHARDT, Dagmar, Rob SAUNDERS a Jane BURRY, ed. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-26376-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje možnostem FDM tisku modelářských hlín a konstrukci experimentálního extrudéru pro 3D tisk tohoto materiálu. Extrudér přináší možnost 3D tisku uměleckých a designérských předmětů menších velikostí. Na trhu v roce 2019 není zařízení určené k tisku zmíněných hlín.

Hlavním cílem této práce je vytvořit konstrukční návrh extrudéru. V teoretické části se práce zabývá shrnutím vlastností modelářských hlín. V praktické části je provedena identifikace parametrů extrudéru, měření termodynamických vlastností hlíny, měření sil potřebných k extruzi při různých teplotách a samotný konstrukční návrh pístového extrudéru.

Zařízení vytlačuje přehřátý materiál pomocí šroubového pístu. Axiálního posuvu šroubu se dosahuje otáčením matice. Zařízení je přizpůsoben pro rychlou výměnu kapsle s přehřátou hlínou.

Výsledný extrudér je vhodný pro experimentální tisky modelářské hlíny o různých viskozitách. Pomocí extrudéru je možné otestovat skutečné chování modelářských hlín při tisku a navrhnout optimální tiskové parametry, pro jeho masivnější použití.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, modelářská hlína, extrudér, píst, FDM

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with possibilities of FDM printing of industrial clay and construction of experimental extruder for 3D printing of this material. The extruder delivers 3D prints of art and design items. There is no facility to print these clays on 2019 market.

The main task of this work is to create a design of the extruder. The theoretical part of the thesis deals with summary of modeling clay properties. In the practical part, the parameters of the extruder are determined, the thermodynamic properties of the clay are measured, the forces necessary for extrusion are measured at different temperatures and the piston extruder is designed.

The device extrude the preheated material with a screw piston. Axial displacement of the screw is achieved by turning the nut. The device is adapted for quick replacement of the capsule with preheated clay.

The resulting extruder is suitable for experimental prints of model clay with different viscosities. Using the extruder, it is possible to test the actual behavior of the modeling clay during printing and to design optimal printing parameters for its more massive use.

KEYWORDS

3D print, industrial clay, extruder, piston, FDM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽIŽLAVSKÝ, Vít. *Konstrukce experimentálního extrudéru pro 3D tisk modelářské hlíny*[online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117340>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Paloušek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za čas a odborné rady, které mi věnoval. Také bych chtěl poděkovat své rodině, která mě v práci podporovala a vytvářela mi ideální podmínky pro studium.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

TITULNÍ STRANA	1
ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE	3
ABSTRAKT	5
KLÍČOVÁ SLOVA	5
ABSTRACT	5
KEYWORDS	5
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	7
PODĚKOVÁNÍ	9
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE	9
OBSAH	11
1 ÚVOD	14
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1 Aditivní technologie	15
2.1.1 Fused deposition modeling (FDM)	15
2.2 Modelářské hlíny	18
2.2.1 Výrobky Chavant	18
2.2.2 Výrobky Staedtler	19
2.2.3 Monster Clay	20
2.3 Tisk modelářské hlíny	21
2.3.1 Tisk vosku	21
2.3.2 Tisk keramických hlín (jílů)	22
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	25
3.1 Analýza problému	25
3.2 Cíl práce	26
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	27
4.1 Tisk z bloku materiálu	27
4.1.1 Definice základních parametrů	28

4.1.2	Hmotnostní a objemový průtok	28
4.1.3	Rozměry tiskového válce	30
4.1.4	Výroba tiskového válce	31
4.1.5	Měrná tepelná kapacita	32
4.1.6	Tepelný tok	33
4.1.7	Tepelné ztráty	34
4.1.8	Topné spirály	38
4.1.9	Regulátor N1040	38
4.1.10	Pokus měření síly	39
4.1.11	Konstrukce aparatury	40
4.1.12	Způsob realizace pokusu	42
4.1.13	Realizace pokusu	43
4.1.14	Vyhodnocení výsledků	50
4.1.15	Teplotní profil	51
4.2	Tisk z taveniny pomocí pístu	52
4.2.1	Měření zatížení při teplotě 80°C	53
4.3	Výběr vhodné varianty	56
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	57
5.1	Princip funkce extrudéru	57
5.2	Výpočty pístu	58
5.2.1	Přepočet rychlosti	58
5.2.2	Výpočet šroubu	58
5.2.3	Kontrola šroubu	60
5.2.4	Doporučené uložení	61
5.3	Sestavení extrudéru	64
5.3.1	Píst	64
5.3.2	Pohon pístu	64
5.3.3	Tělo extrudéru	65
5.3.4	Extrudér celek	65
6	DISKUZE	66
7	ZÁVĚR	67
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	73
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	77

11	SEZNAM TABULEK	78
12	SEZNAM PŘÍLOH	79

1 ÚVOD

3D tisk je poměrně mladá, zato rychle se rozvíjející výrobní technologie z oblasti aditivních technologií. Tvoří ústřední bod technologií zvaných rapid prototyping. Jak i název napovídá, jedná se o soubor výrobních a návrhových metod určených především k prototypování zařízení. V sériové výrobě zatím 3D tisk své uplatnění hledá obtížně, díky nižší produktivitě či nehomogenním mechanickým vlastnostem výsledného produktu.

Hlavní podstatou všech metod 3D tisku je nanášení materiálu na podložku v jednotlivých vrstvách. V dnešní době je možné tisknout různé druhy materiálu. Do nejpočetnější skupiny patří polymery jako například PLA či ABS. V menší míře se dá tisknout i z kovů a méně běžných materiálů. V posledních deseti letech je možné zaznamenat rozvoj v tisku například keramiky, písku, betonu či keramických hlín. Nabízí se otázka, proč mezi tisknutelné materiály nezařadit modelářské hlíny. V podstatě se jedná o keramickou hlínu smíšenou s voskem místo vody. Hlíny jsou za pokojové teploty tuhé a třískově obrobitelné. Se zvyšující teplotou měknou, některé až do tekutého stavu. Díky těmto vlastnostem můžeme předpokládat jejich dobrou tisknutelnost. Na rozdíl od tisku jílových hlín se touto problematikou žádný výrobce ve větší míře nezajímá a zařízení vhodné pro tisk modelářské hlíny na trhu nenajdeme.

Modelářské hlíny, v anglickém jazyce zvané industrial clay, nacházejí uplatnění v největší míře mezi designéry a sochaři. Na hliněných modelech, které jsou nejprve třískově obrobeny do základní formy, designéři doladují konečnou podobu např. automobilů. V tomto oboru může být tisk přínosem, protože umožňuje vytváření konceptů na řádově levnějších strojích, než jsou zařízení určená k třískovému obrábění. Mezi další potenciální zájemce patří sochaři užívající tento materiál pro výrobu modelů, které jsou následně otisknuty do silikonové formy. Poté je možno jejich výrobky odlít z prakticky jakéhokoliv materiálu včetně kovů. Modelářské hlíny lze rovněž využívat k návrhu domů, proto mezi další odbytíště 3D tiskáren na modelářskou hlínu můžeme zařadit architektonická studia.

Cílem této práce je vyvinout extrudér na modelářskou hlínu, který bude schopen vynášet materiál v požadovaném množství a kvalitě.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Aditivní technologie

Aditivní technologie jsou technologie, při kterých vzniká objekt přidáváním materiálu, nikoliv odebíráním či přetvářením jako u konvenčních výrobních technologií [1]. Nejběžněji používané označení pro zmíněné metody je trojrozměrný tisk, zkráceně 3D tisk [2]. Materiál se nanáší, spéká nebo slepuje vrstvu po vrstvě podle série trojrozměrných dat modelu [1] [2].

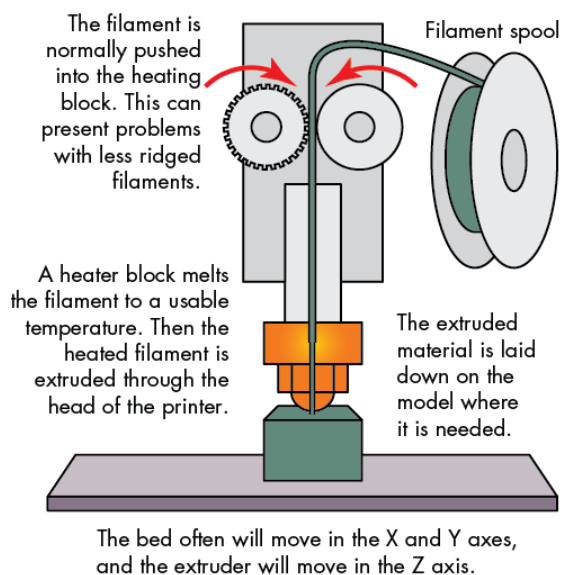
Aditivní technologie tvoří ústřední bod metod rapid prototyping, které jsou určené k výrobě prototypů za mnohem kratší dobu a nižší cenu než u konvenčních technologií. Časovou úsporu zajišťuje jednoduchá příprava modelu i výrobního programu [1] [2]. Samotný tisk poté může probíhat i bez obsluhy. Výroba součástí přidáváním materiálu redukuje množství odpadu a přispívá ke zlevnění celého procesu.

Aditivní technologie je možné rozdělit do několika skupin podle jejich technologické podstaty, tedy způsobu nanášení a spojování jednotlivých vrstev. Pro potřeby této bakalářské práce bude jedinou podstatnou technologií FDM.

2.1.1 Fused deposition modeling (FDM)

Technologie též známá jako extruze či zkráceně FDM je nejrozšířenější metoda 3D tisku dostupná pro modeláře nadšence i malé podniky [3]. Technologie je ve velké míře proslavena projektem Rep Rap, který tiskárny zlevnil a zvýšil povědomí o této aditivní technologii. [3]

Podstata tisku spočívá v tlačení materiálu skrz trysku zvanou extruder. (obr. 2-1) Tisková hlava se pohybuje v souřadnicích xy a materiál ukládá na podložku. Když tiskárna vrstvu dokončí, posune se o výšku vrstvy v souřadnici z a pokračuje další vrstvou [4].



obr. 2-1 Schéma principu FDM tiskárny na plast. [5]

Technologie FDM umožňuje tisknout objekty od velikosti několika milimetrů až po mnohametrové budovy. V největší míře tato technologie zpracovává polymerní materiály známé jako termoplasty.

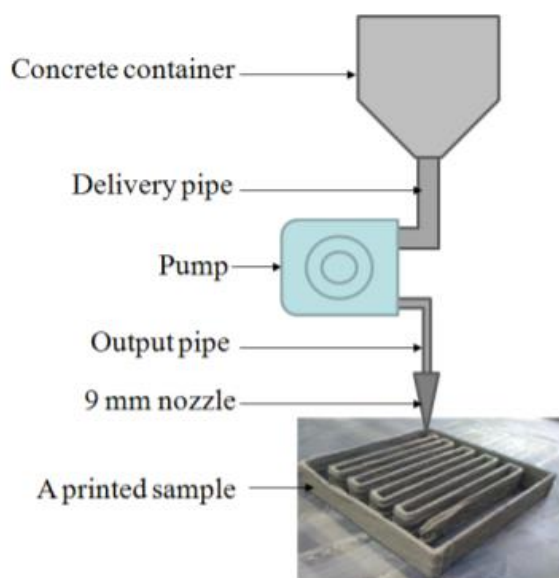
Výchozí materiál bývá dodáván ve formě tenkých filamentů. Termoplasty jsou polymery, které s rostoucí teplotou měknou a dosahují teploty skelného přechodu, při které jejich chování odpovídá viskózní tekutině. Díky této vlastnosti je možné je snadno extrudovat za pomoci zvýšené teploty. Po vynesení na podložku vlivem ochlazování materiál opět ztuhne do pevné formy. Jsou dodávány ve formě tenkých filamentů nejčastějších průměrů 1,75 mm, 2,85 mm, 2,90 mm a 3,00 mm [6].

Název FDM je patentovaný firmou Stratasys, ostatní výrobci používají název fused filament fabrication (FFF) [4].

Tisk betonu

Tisk betonu přináší stavebnictví zcela nové možnosti. Tiskárny na beton dokáží rychle a levně stavět budovy menších až středních velikostí nebo tisknout speciální stavební prvky [7]. Velikost tisknutých objektů je omezena velikostí stroje. Ty jsou řešeny jako ramena otočná kolem středového sloupu, nebo vozíky na dvou kolejnicích [7].

Technologie je založená na chemické reakci vytvrzování cementu. Směs je po rozředění vodou viskózní a dá se extrudovat například pomocí šroubového extrudéru nebo pístového čerpadla (obr. 2-2). Po uložení na podložku chemická reakce zapříčiní tuhnutí. Aby směs tuhla dostatečně rychle a byla schopná nést vrstvy nad sebou, přidávají se do betonu aditiva zvaná superplasticizéry [7]. Tato aditiva umožňují snížit obsah vody. Do směsi je možné přidávat celou řadu dalších aditiv, například skelná vlákna, která zvyšuje pevnost celé konstrukce [7].



obr. 2-2 Schéma tisku betonu. [8]

Tisk hlíny

Technologie tisku tohoto materiálu je podobná tisku betonu, nicméně objevují se zde jiná úskalí. Více v kapitole (2.3.2).

Tisk potravin

Tisk potravin má být nápomocný řešení nedostatku potravin pro rostoucí lidskou populaci. Tiskárny pracují s práškovými materiály rozředěnými na gely, které nanášejí na tiskovou plochu jako jiné FDM tiskárny [9]. Mají pomoci ve tvorbě chutné na pohled lákavé stravy s vyváženými nutričními hodnotami. Mohou připravovat stravu ze surovin, které člověk nevyhledává díky abnormálnímu vzhledu. Tiskárny připraví jen tvar pokrmu, následně je třeba jej uvařit či upéct [9]. Zamýšlí se jejich užití na vesmírných stanicích, kde mohou tiskárny připravovat zajímavá a vyvážená jídla ze surovin uložených v kompaktní formě [9]. Existují již tiskárny schopné tisknout jídlo, jedná se většinou o směsi ze zeleniny, rýže a brambor. Těmto surovinám je možné dodat téměř jakýkoliv tvar, [9].

Tisk čokolády

Tisk čokolády můžeme také považovat za tisk potravin. V tomto případě u tohoto materiálu můžeme pozorovat podobnost s modelářskými hlínami. Tisknutelnost čokolády vyplývá z amorfního chování tuku, který je jednou ze základních surovin. Výchozím materiálem je roztavená čokoláda zavřená v tlakové nádobě [10]. Technologie se využívá pro tvorbu originálních svatebních dortů a čokoládových pralinek [10].

2.2 Modelářské hlíny

Modelářská hlína je zvláštním materiálem, známým také pod anglickým názvem industrial clay. Skládá se převážně z voskové hmoty, olejů a plniva, například jílu. Hlavní oblastí užití je design automobilů, motocyklů či jiných zařízení [11]. Hmota je za pokojové teploty tuhá a dobře drží svůj tvar, nicméně působením tepla měkne. Můžeme ji modelovat, krájet, odlévat, sprejovat a některé druhy dokonce frézovat [12].

Mezi hlavní producenty tohoto materiálu můžeme zařadit německého výrobce Staedtler [11] a amerického výrobce Chavant [13]. Nabízejí poměrně široký sortiment produktů s odlišnými mechanickými vlastnostmi, chemickým složením a různými možnostmi použití.

2.2.1 Výrobky Chavant

Původní recepturu vytvořili ve Francii, dnes společnost sídlí v USA [13].

V nabídce internetového obchodu SILIKONY s.r.o. je možné nalézt hlíny společnosti Chavant dodávané na náš trh [11].

Chavant Autostyle

je tvrdý a je možné jej strojově opracovávat. Používá se např. k vytváření modelů v automobilovém, námořním a leteckém průmyslu a na velmi podrobně orientované umělecké předměty [11]. Je bez síry. Není zcela tekutý při žádné teplotě, při nahřívání nad 65°C nenávratně tvrdne [12].

tab. 2-1 Vlastnosti hlíny Chavant Autostyle

Typ hlíny	Chavant Autostyle
1.02 – 1.05 g/ml	1.02 – 1.05 g/ cm ³ [14]
Pracovní teplota	55-60°C [14]
Tvrdost A	38 (20°C) [12]

Le Beau Touche HM

Hlína je tvrdá a dobře opracovatelná, bohužel při nahřívání nedosáhne viskozity potřebné k odlévání [12]. Používá se při pokojové teplotě.

Y2

Hlína vhodná pro vysoce realistické modely, je relativně lehká [12]. Je kompletně tekutá při teplotách okolo 99 °C, nicméně tavení způsobuje nevratné zpevnění [12].

NSP

Hlína se vyrábí ve třech variantách Medium, Hard a Soft, ale na českém trhu se verze hard nenabízí [11]. Jedná se o hlínu bez obsahu síry, kterou je možné kompletně roztavit a následně odlévat. Po roztavení materiál ztvdne víc, a pro navrácení původní houževnatosti je nutné ho prohníst [12].

tab. 2-2 Srovnání základních vlastností hlín Chavant NSP Medium a Soft [14]

Typ hlíny	NSP Medium	NSP Soft
Hustota	1,52 g/cm ³	1,59 g/cm ³
Pracovní teplota	20-42 °C	20-42 °C
Teplota měknutí	40 °C	40 °C
Teplota tavení	80-90 °C	80-90 °C

2.2.2 Výrobky Staedtler

Staedtler Industrial products je největší výrobce průmyslových modelářských hlín sídlící v Německu [13]. V jejich nabídce nalezneme 3 série modelářských hlín s názvem Marsclay, SuperClay a TechClay [13].

Marsclay

Marsclay je standartní hlína vyráběná od roku 1985.

tab. 2-3 Srovnání základních vlastností hlín Marsclay Medium a Light [15] [16]

Typ hlíny	Medium	Light
Hustota	1,5 g cm ⁻³ [16]	1,5 g cm ⁻³ [15]
Pracovní teplota	55-60 °C [16]	55-60 °C [15]
Koeficient délkové roztažnosti α	$2,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [16]	$2,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [15]

SuperClay

SuperClay je hlína novější receptury obsahující síru.

tab. 2-4 Srovnání základních vlastností hlín SuperClay Medium a Hard [17] [18]

Typ hlíny	Medium	Hard
Hustota	1,4 g cm ⁻³ [18]	1,5 g cm ⁻³ [17]
Pracovní teplota	50-60 °C [18]	55-60 °C [17]
Tvrdost A	65(20°C) [18]	74(20°C) [17]

Tvrdost

Udává se v hloubce vrubu materiálu, který vytvoří normalizovaný jehlan, při normalizovaných podmínkách: tíha vyvolaná 150 g působící po dobu 10 s [19].

TechClay

TechClay je hlína novější receptury bez obsahu síry. Jedná se o lehčí alternativu SuperClay a je vhodná pro modely větších velikostí.

tab. 2-5 Základní vlastností hlíny TechClay [20]

Typ hlíny	TechClay
Hustota	0,8 g cm ⁻³ [20]
Pracovní teplota	40-55 °C [20]
Tvrdost A	55 (20 °C) [20]

2.2.3 Monster Clay

Monster Clay jsou modelovací hmoty na olejové bázi, bez obsahu síry. Jsou jemné, za pokojové teploty tuhé a za zvýšených teplot dobře zpracovatelné [21]. Vhodné i pro detailní sochařskou práci. Teplota tavení je poměrně nízká a to 58 °C. [21] Optimální teplota lití je stanovena na 65 °C [21]. Při práci nesmí teplota překročit 85°C, aby nedošlo k usazování jednotlivých komponent. Vyrábí se ve třech provedeních: Soft, Medium, Hard [22].

tab. 2-6 Základní vlastností hlíny Monster Clay [21]

Typ hlíny	Monster Clay
Hustota	0,8125 g cm ⁻³ [21]
Teplota tavení	58 °C [21]
Viskozita (ASTM2161 @210°F)	45-50 SUS [21]

Udávaná viskozita je dynamická Sayboltova viskozita. Jedná se o standardizovaný test podle normy ASTM2161 [23], při kterém se měří, čas za který proteče 60 ml látky normovanou trubičkou Sayboltova viskozimetru při normovaných podmínkách (98,9°C) [23]. Udává se v sekundách SUS Saybolt universal seconds.

2.3 Tisk modelářské hlíny

Na trhu v současné době nenajdeme žádné zařízení, které umožňuje 3D tisk zmíněného materiálu. Tím vyvstává otázka, zda je zpracování modelářských hlín aditivními technologiemi vůbec možné. Pro nalezení odpovědi je třeba pochopit chování jednotlivých složek i materiálu jako celku. Tisk vosku i keramické hlíny jsou v dnešní době známy.

2.3.1 Tisk vosku

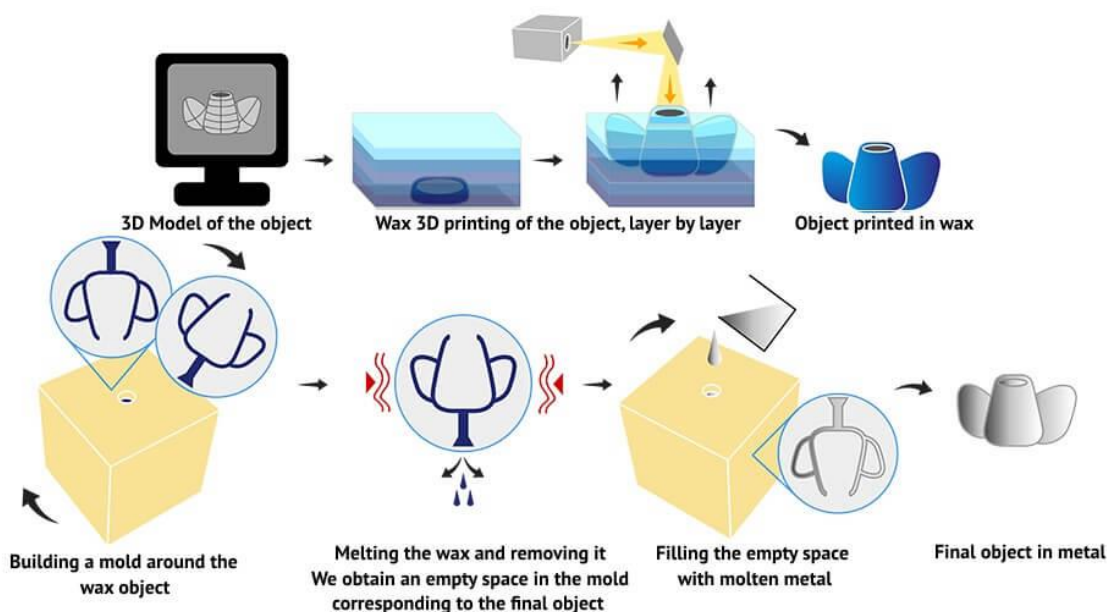
Vosky jsou estery vyšších mastných kyselin a vyšších jednosytných alkoholů [24]. Vosky se vyznačují amorfním chováním. Za pokojové teploty jsou tuhé, s rostoucí teplotou měknou, nicméně nemají definovanou přesnou teplotu tavení. Jsou nerozpustné ve vodě, ale rozpustné v nepolárních rozpouštědlech (benzín) [24].

Dominantním oborem pro uplatnění 3D tisku vosku je slévárenství a šperkařství, přesněji technologie přesného lití [25]. Z vosku se dají tisknout vytavitelné modely bez potřeby výroby silikonových forem [26]. Touto technologií se dají tvořit odlitky téměř jakéhokoliv tvaru. Častým uplatněním 3D tisku vosku je výroba kovových šperků z 3D modelu [25].

Výrobci dodávají speciální filament s vlastnostmi odpovídajícími tvrdému vosku. Vhodným nastavením tiskových parametrů lze vosk tisknout prakticky na jakékoliv FDM tiskárně.

- Teplota trysky 180 °C [26].
- Velikost trysky 0,2 až 0,3 mm [26].
- Je možno tisknout i bez vyhřívání podložky (doporučeno 40 °C) [26].

Postup výroby kovové součásti pomocí FDM tisku je následující (obr. 2-3). Objekt je vytištěn z vosku a zaformuje se do keramické nebo sádrové formy. Po zaschnutí se forma za vysoké teploty vypálí a vosk vyteče. Do vzniklé dutiny je možné odlévat tekutý kov. Formy jsou jednorázové a pro vytažení odlitku je třeba je rozbít [25].



obr. 2-3 Proces výroby odlitku z tištěné součásti [25]

2.3.2 Tisk keramických hlín (jílů)

Jíly

Jíly jsou neupravené usazené horniny [27]. Jsou tvořeny jílovými minerály, jako třeba pelitové frakce s velikostí jednotlivých zrn pod 2 μm (resp. 4 μm) [27].

Základní vlastnosti jílu do značné míry závisí na obsahu vody. S dostatečným množstvím vody jsou to materiály plastické, dobře zpracovatelné [27]. V suché podobě se jedná o horninu sypkou a křehkou [27].

Základní složkou keramických hlín jsou již zmíněné jíly. Keramika patří mezi první materiály, které kdy člověk začal používat. Nejprve na stavbu příbytků a později při výrobě nádob. Dnešní technické keramiky svými vlastnostmi nacházejí široké využití od stavby domů až po kloubní náhrady.

Tisk

Tisk jílových materiálů je vcelku nové, zato rychle se rozvíjející odvětví, které může sloužit k výrobě předmětů denní potřeby, ale také jako nová stavební technologie. Můžeme tisknout kuchyňské nádoby či umělecké předměty [28]. Pro tyto aplikace je nezbytné hlínu vypálit (slinout v peci). Pro účely stavebnictví je možné tisknout některé základní prvky, například cihly, nebo použít tiskárnu přímo k vytištění celého domu [29]. Hliněné domy z nepálené hlíny mají možná horší odolnost proti vodě, ale jak je známo z architektury našich předků, tento problém není fatální.

Tiskárny jsou schopny tisknout jíly s různou zrnitostí ostríva či příměsemi aditivních vláken [28]. Možnost tisku z domů z jílu a surovin dostupných přímo v místě stavby může značně zlevnit celý proces a umožní dosáhnout na nové bydlení většímu množství lidí, dokonce i v oblastech třetího světa.

Základní princip tisku jílu a keramických hlín spočívá v extruzi pastovitého materiálu [30]. Hlínu je třeba naředit na požadovanou viskozitu a následně stlačit do tlakového válce [31]. Zdá se být vhodné materiál ve válci odvzdušnit například pomocí vakua [30]. Výsledný povrch objektu je potom hladší a kvalitnější. Materiál je z tlakového válce extrudován skrz trysku na tiskovou podložku, kde je vrstven obdobným způsobem jako u standardních FDM tiskáren.

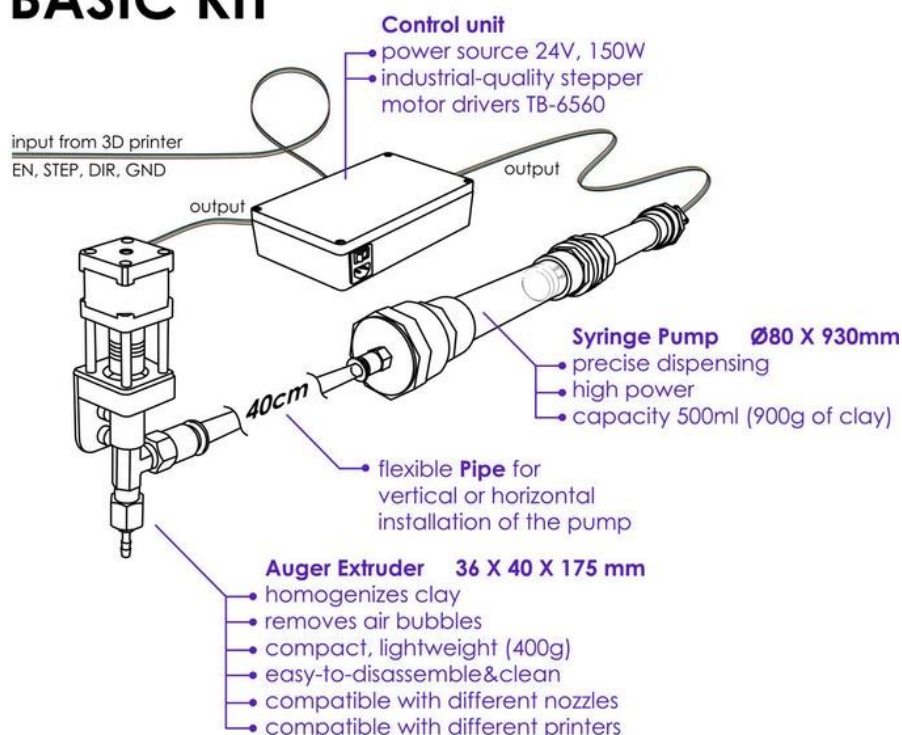
Tlakový zásobník může být řešen:

- Pneumaticky [30].
- Mechanicky [30].

Tlakový zásobník může být umístěn:

- Na tiskové hlavě: Toto řešení zaručuje kvalitní a kontinuální výnos materiálu, ovšem zatěžuje konstrukci tiskárny, jelikož zásobníky u stolních tiskáren mohou vážit i 10 kg [30].
- Mimo tiskovou hlavu: Konstrukce je méně zatížená, zato je potřeba tlačít hlínu přes přívodní hadici, což může zapříčinit nelineární průtok materiálu a nižší kvalitu výsledného výtisku [30].

BASIC KIT



obr. 2-4 Schéma mechanického tlakového extruderu od Anatola Berezkina. [32]

V extrudéru může být pomocný dopravníkový šroub poháněný servomotorem (obr. 2-4) [30]. Jeho hlavní funkcí je zajištění požadovaného průtoku. Pokud je zásobník umístěn přímo nad extrudérem, šroub není potřebný, jeho uplatnění je spíše u tiskáren se zásobníkem uloženým mimo svou vlastní konstrukci [30].

Výrobci

Problematicke tisku hlín se věnuje několik firem a přivádějí na trh zajímavá řešení těchto tiskáren. Pro příklad si můžeme uvést společnost WASP [28].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z předchozí části práce vyplývá, že problematika tisku modelářských hlín je neprozkoumané odvětví, kterému se zatím nevěnuje žádný výrobce. Z jednotlivých komponent hlíny však tisk možný je. V dnešní době je již rozpracovaná jak technologie 3D tisku tvrdého vosku, tak jílových hlín.

Z rešerše vyplývá, že vlastnosti modelářských hlín odpovídají zejména jejich voskové složce. Jejich chování odpovídá amorfním látkám a dá se tedy předpokládat, že je možné je tisknout technologií FDM. Vhodnou viskozitu potřebnou k tisku můžeme zajistit správným nastavením tiskové teploty. Na druhou stranu tuhnutí hlíny na podložce je možné zajistit chladicím ventilátorem. Hlína při pokojové teplotě by měla být dost tuhá, aby dokázala unést vrstvy nad sebou až do maximální výšky objektového prostoru tiskárny.

Bohužel ne všechny hlíny mají zaručenou tavitelnost a u některých může dojít při tavení k nevratné degradaci. Jako příklad si můžeme uvést Chavant Autoclay.

Prvním krokem je výběr vhodné hlíny. Pro prvotní návrh je třeba vybrat hlínu, která je zaručeně tavitelná bez následného degradačního vlivu na materiál. Dále je potřeba, aby teploty měknutí a hustota výchozího materiálu byly co nejnižší. V neposlední řadě nás zajímá dostupnost materiálu na našem trhu. Tyto požadavky nejlépe splňuje hlína Monster Clay.

Je třeba definovat některé základní parametry. K dopočítání správného výkonu topné části extrudéru je třeba změřit měrnou tepelnou kapacitu materiálu. Vhodné by bylo znát mez kluzu materiálu. Podle těchto dat je třeba přistupovat ke konstrukci. Je potřeba zajistit, aby hmotnost extruderu, aby příliš nazatěžovala konstrukci či pohybové motory tiskárny.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je konstrukce extrudéru pro 3D tisk modelářské hlíny. Extrudér má být určen k tisku malých objektů pro designérské a umělecké potřeby s maximálním tiskovým prostorem $400 \times 400 \times 400$ mm.

Mezi dílčí cíle patří identifikace provozních parametrů, návrh dvou konstrukčních variant, realizace návrhu zvolené varianty. Tvorba 3D modelů a výkresová dokumentace sestavení.

Mezi další určující hodnoty patří průměr trysky extrudéru, který je stanoven na 4 mm. Průměr válce extrudéru je omezen na 40 mm, protože se jedná o poměrně kompaktní rozměr, ke kterému existuje celá škála topných pásů. Extrudér musí být schopený protlačovat tryskou dostatečné množství materiálu, aby bylo možné tisknout rychlostí až 50 mm/s.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Tisk z bloku materiálu

Toto řešení vychází z myšlenky standardních filamentových extrudérů. Tenký filament je nahrazen válcem hlíny o mnohem větším průřezu. Výška válce je omezena jen prostorem a konstrukčním pojetím tiskárny. Výroba válce z hlíny nebude nikterak komplikovaná, pravděpodobně jej bude možné jednoduše odlévat.

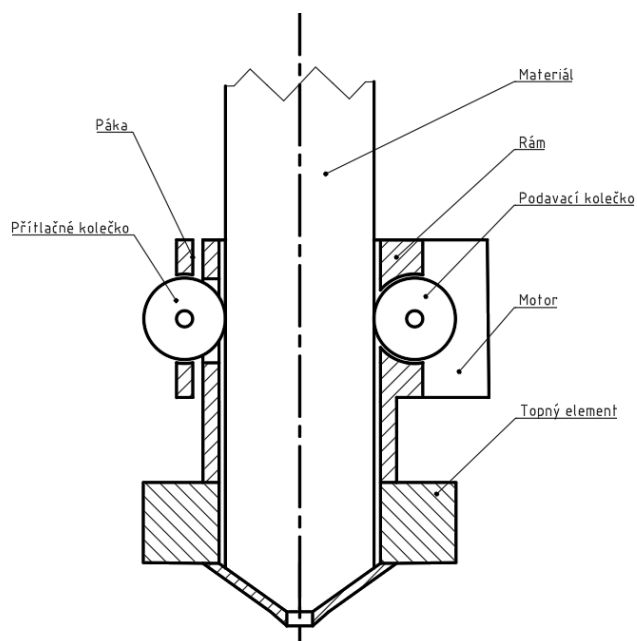
Servomotor otáčí pohybovým kolečkem, které tlačí materiál směrem do extrudéru. Střední část extrudéru je topná oblast, ve které se materiál natavuje na požadovanou viskozitu. Z ní vystupuje skrz trysku. Doplnění materiálu může probíhat jednoduchým přidáním dalšího válce, nebo ho lze vyřešit pomocí mechanického podavače.

Výhody:

- Snadné doplňování materiálu.
- Díky malé oblasti nahřátého materiálu i příznivá energetická náročnost.
- Schopnost kontinuálního tisku.
- Možnost průběžně regulovat viskozitu pomocí teploty.

Nevýhody:

- Nutnost připravovat materiál do polotovarů (válců).
- Prozatím neznámá velikost.
- Horší regulace průtoku a problém přenášení momentu na ne zcela tuhý materiál.



obr. 4-3 Schéma návrhu tisku z bloku materiálu.

4.1.1 Definice základních parametrů

Aby byl tento koncept realizovatelný je třeba zjistit měrnou tepelnou kapacitu hlíny. Další termodynamické vlastnosti materiálu, jako měrná tepelná vodivost či součinitel přestupu by bylo vhodné rovněž znát. Díky jejich znalosti je možné vypočítat požadovaný topný výkon a průměr válce materiálu. Jejich hodnoty nejsou bohužel výrobcí udávány a je třeba je změřit.

4.1.2 Hmotnostní a objemový průtok

Jedinou přímo zadanou hodnotou je průměr trysky. Ostatní veličiny je třeba zvolit či dopočítat.

$D_{tr} = 4 \text{ mm}$	průměr trysky
$v_t = 50 \text{ mm s}^{-1}$	rychlost tisku
$s_v = 6 \text{ mm}$	šířka tisknuté vrstvy
$\rho = 1170 \text{ kg m}^{-3}$	hustota hlíny
$m = 2,27 \text{ kg}$	hmotnost jednoho balení hlíny [11]
$d_h = 36 \text{ mm}$	průměr hliněného válce

Rychlost tisku stolních FDM tiskáren se pohybuje kolem 100 ms^{-1} . Jelikož tisknutelnost materiálu není známá, tak se rychlost stanoví na hodnotu nižší tedy 50 mms^{-1} . Výška vrstvy je volitelná hodnota a obvykle se její maximální hodnota stanovuje podle rovnice

$$h_{vteor} = 0,75 \cdot D_{tr} = 0,75 \cdot 4 = 3 \text{ mm} \quad (1)$$

Tato hodnota je poměrně vysoká. K zahřátí takového množství materiálu by bylo třeba velké množství energie.

Šířka vrstvy vyplývá z rychlosti posuvu a průtoku materiálu. V tomto případě se problém řeší obráceně. Rychlost výtoku materiálu bude dopočítána právě podle šířky a výšky vrstvy.

Pro výpočet rychlosti průtoku materiálu tryskou je třeba znát průřez tisknuté vrstvy.

$$S_v = h_v \cdot s_v = 3 \cdot 6 = 18 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

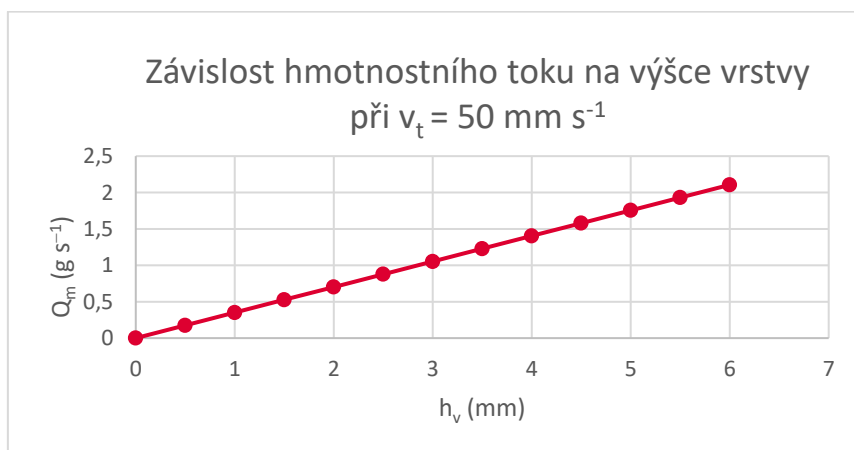
Vynásobením průřezu rychlostí posuvu získáme objemový průtok.

$$Q_v = S_v \cdot v_t = 18 \cdot 50 = 900 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

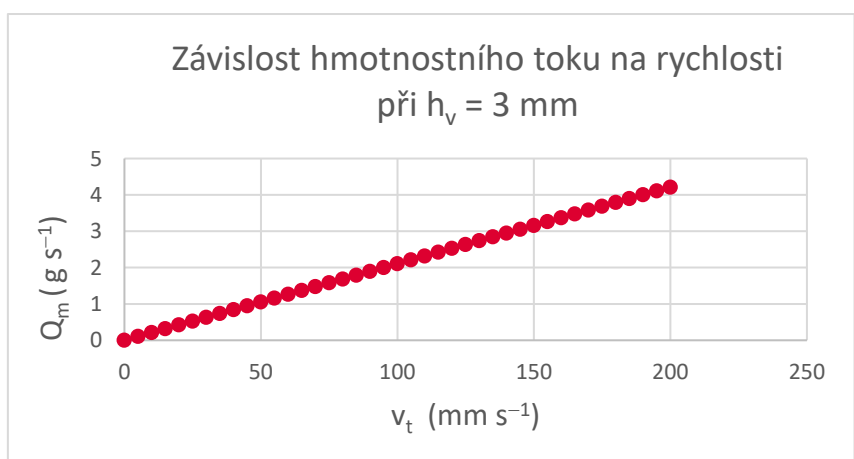
Po roznásobení hustotou dostaneme hmotnostní průtok materiálu.

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = 900 \cdot 10^3 \cdot \frac{1170}{10^6} = 1,05 \text{ g s}^{-1} \quad (4)$$

Hmotnostní průtok celým extrudér je konstantní a udává jaké množství hlíny projde extruderem za jednotku času.



obr. 4-1 Závislost výšky vrstvy na hmotnostním toku při $v_t = 50 \text{ mm s}^{-1}$



obr. 4-2 Závislost hmotnostního toku na rychlosti při $h_v = 3 \text{ mm}$

4.1.3 Rozměry tiskového válce

Pokud použijeme vnitřní průměr těla extrudéru jako průměr hliněného válce d_h , lze průřez válce dopočítat z následující rovnice.

$$S_h = \pi \cdot \left(\frac{d_h}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,036}{2}\right)^2 = 1,02 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

Pro teoretickou výšku válce vyrobeného z jednoho balení platí.

$$h_h = \frac{m}{S_h \cdot \rho} = \frac{2,27}{1,02 \cdot 10^3 \cdot 1170} \cong 1,91 \text{ m} \quad (6)$$

Válec této výšky není vhodné umístit na extrudér. Vlivem dynamických silových účinků způsobených zrychlením extrudéru docházelo k deformacím válce, nebo dokonce k mezním stavům. Bohužel u materiálu neznáme mez kluzu ani pevnosti, aby bylo možné tuto teorii podpořit výpočtem. Materiálové charakteristiky je samozřejmě možné získat pomocí tahové zkoušky. Bohužel časová i finanční náročnost těchto testů je vyšší než užitá hodnota, kterou by přinesly.

Výšku válce je třeba zvolit tak, aby nebylo nutné válec měnit příliš často.

Pro hmotnostní tok platí, že je v celém extrudéru konstantní.

$$Q_m = \text{konstanta} \quad (7)$$

Potom pro rychlost posuvu válce platí.

$$v_h = \frac{Q_v}{S_h} = \frac{900 \cdot 60}{1,02 \cdot 10^3} = 53,05 \text{ mm min}^{-1} \quad (8)$$

Pro čas tisku celého balení platí.

$$t_h = \frac{m}{Q_m} = \frac{2\,270}{1,053} = 2,16 \cdot 10^3 \text{ s} \cong 35,9 \text{ min} \quad (9)$$

S ohledem na dynamické účinky posuvu tedy zvolíme výšku válce.

$$h_{hf} = \frac{h_h}{2} = \frac{1,91}{2} = 0,953 \text{ m} \quad (10)$$

Pro čas tisku tedy píšeme.

$$t_{hf} = \frac{t_h}{2} = \frac{2,16 \cdot 10^3}{2} = 1,78 \cdot 10^3 \text{ s} \cong 18 \text{ min} \quad (11)$$

Potřeba výměny tiskového válce je častá, nicméně nasazení nového válce je činnost časově nenáročná.

4.1.4 Výroba tiskového válce

Hlína Monster Clay se při teplotách nad 58 °C chová jako viskózní kapalina. Tato vlastnost umožňuje výrobu tiskového válce odléváním. Za tímto účelem je třeba navrhnout dostatečně přesnou formu. Pro snadnou opakovatelnost výroby je třeba, aby tato forma byla jednoduchá na sestavení a nedocházelo k jejímu poškození. Tyto podmínky nejlépe plní kovová forma. Výroba přesné kovové formy je zcela neekonomická. Jako mnohem levnější varianta se jeví výroba formy z trubky, stejně jako tělo extrudéru. Jedná se o hliníkovou trubku o vnějším průměru 40 mm a šířce stěny 2 mm.

Z kapitoly 5.1.2 je známa požadovaná výška válce.

$$h_{hf} = 953 \text{ mm} \quad \text{výška válce}$$

Formu je třeba udělat větší o přídavek na začištění konce válce.

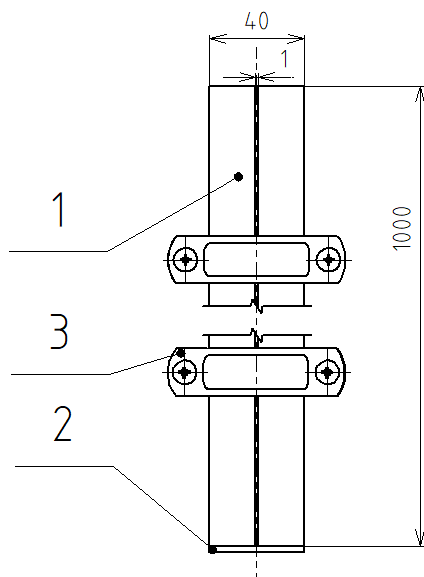
$$c_{fv} = 23 \text{ mm} \quad \text{přídavek}$$

Konečná délka formy odpovídá hodnotě dle rovnice (12).

$$h_f = 2 \cdot c_{fv} + h_{hf} = 2 \cdot 23 + 953 = 999 \text{ mm} \quad (12)$$

Trubka (1) je podélně rozříznuta řezem o šířce $s=1$ mm, stáhnuta ocelovými objímkami (3), které spáru uzavřou. Jeden konec trubky je zacpán koncovkou (3).

Vnitřní obvod válce se o průřez zmenší, což zajistí, že výsledný polotovar válce, bude také menší než samotný vnitřní průměr těla extrudéru. Díky této vůli bude možné válec do extrudéru zasunout.



obr. 4-3 Sestavení formy na hliněné válce

4.1.5 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. K jejímu zjištění je třeba provést pokus s kalorimetrem a kapacitu dopočítat z kalorimetrické rovnice. Jako porovnávací látka je použita voda. Kalorimetr je vytvořený z polystyrenu a k měření teploty slouží laboratorní teploměr od firmy TFA.



obr. 4-4 Ukázka kalorimetru po ukončení pokusu

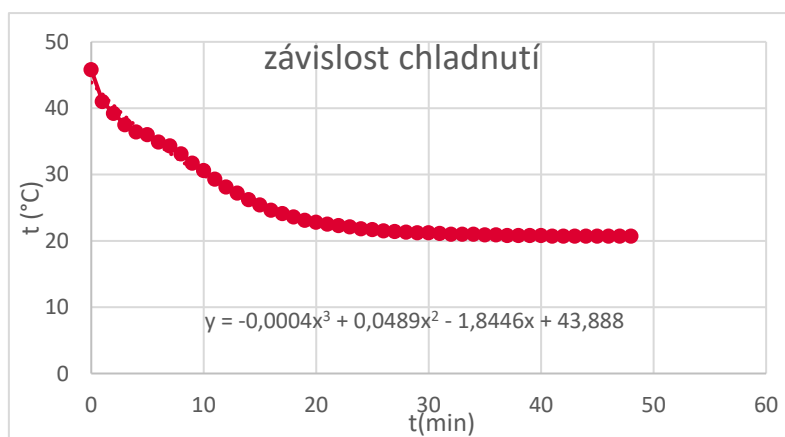
tab. 4-1 Hodnoty měření

veličina	hlína	voda
hmotnost	$m_h = 47 \text{ g}$	$m_v = 222 \text{ g}$
počáteční teplota	$t_{h1} = 45,8 \text{ °C}$	$t_{v1} = 16,5 \text{ °C}$
konečná teplota	$t_2 = 20,7 \text{ °C}$	$t_2 = 20,7 \text{ °C}$
měrná tepelná kapacita	$c_h = ?$	$c_v = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [33]

$$m_h c_h (t_{h1} - t_2) = m_v c_v (t_2 - t_{v1}) \quad (13)$$

$$c_h = \frac{m_v \cdot c_v \cdot (t_2 - t_{v1})}{m_h \cdot (t_{h1} - t_2)} = \frac{0,222 \cdot 4180 \cdot (20,7 - 15,5)}{0,047 \cdot (45,8 - 20,7)} = 3304 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (14)$$

Výsledná hodnota $c_h = 3304 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ je zatížena určitou chybou způsobenou nepřesností měření. Tyto odchylky bude třeba vykompenzovat dimenzováním topného výkonu.



obr. 4-5 Závislost chladnutí středu hlíny na čase

4.1.6 Tepelný tok

Tepelný tok je jiný název pro tepelný výkon. Pro správné navržení topných elementů je třeba vědět, kolik tepla se musí za určitý čas hlíně dodat, aby se zahřála na požadovanou teplotu a došlo k jejímu změknutí nebo natavení.

$c_h = 3304 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ měrná tepelná kapacita hlíny

$Q_m = 1,05 \text{ g s}^{-1}$ hmotnostní průtok

$t_o = 22 \text{ °C}$ počáteční teplota hlíny

$t_{hk} = 80 \text{ °C}$ koncová (tisková) teplota hlíny

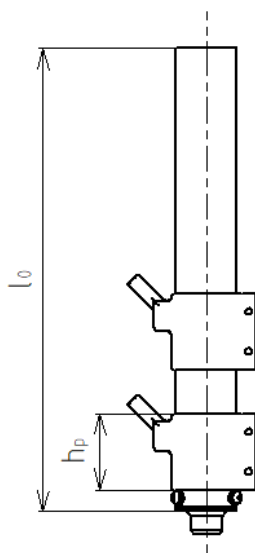
$$Q_h = Q_m C_h (t_{hk} - t_o) =$$

$$= 0,00105 \cdot 3304 \cdot (70 - 22) = 202 \text{ W} \quad (15)$$

4.1.7 Tepelné ztráty

Teplejší těleso vždy předává teplo tělesu studenějšímu. Tento jev, zvaný též jako druhý zákon termodynamiky probíhá uvnitř extrudéru a zprostředkovává tavení hlíny. Nicméně probíhá i na vnější stěně extrudéru a teplo odchází nevyužité do okolí. Velikost této tepelné ztráty je třeba spočítat a podle výsledků stanovit, zda je třeba tělo extrudéru izolovat, nebo je možné jej nechat odkryté pro snadnější regulaci teploty pomocí ventilátoru.

Výměna tepla probíhá třemi způsoby, vedením, prouděním a zářením. V tomto případě je dominantní vedení a záření.



obr. 4-6 Rozložení pro výpočet ztrát

$t_1 = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$	průměrná teplota topných spirál
$t_2 = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	průměrná teplota válce
$t_3 = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$	průměrná teplota okolí
$T_1 = 353,15 \text{ K}$	průměrná teplota topných pásů
$T_2 = 348,15 \text{ K}$	průměrná teplota válce
$T_3 = 295,15$	průměrná teplota okolí

$\varepsilon_1 = 0,11$	emisivita topných pásů [34]
$\varepsilon_2 = 0,06$	emisivita topných pásů [34]
$h_p = 50 \text{ mm}$	výška topného pásu (obr. 4-6)
$d_2 = 40 \text{ mm}$	vnější průměr válce
$d_1 = 46 \text{ mm}$	vnější průměr pásu
$\sigma_0 = 5,6697\text{E-}08 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-2}$	Stefan-Boltzmanova konstanta [34]
$l_0 = 300 \text{ mm}$	počáteční délka válce (obr. 4-6)
$\nu_v = 0,11 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	kinematická viskozita vzduchu
$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$c = 0,023$	konstanta pro válec
$m = 0,5$	konstanta pro laminární proudění
$n = 0,4$	konstanta pro válec [34]
$\lambda = 0,028 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	tepelná vodivost vzduchu [34]
$P_r = 0,71$	Prandtlovo číslo [35]

Záření

Pro výpočet záření si celý extrudér zjednodušíme na válec, který rozdělíme na 2 části. Část topných elementů, které mají vyšší průměrnou teplotu, a část odhaleného těla extrudéru. Zjednodušení je možno chápat jako záření malého povrchu ve velkém prostoru. Záření samotné trysky je zanedbáno.

Nejdříve je třeba dopočítat obsahy ploch obou částí válce.

Pro část topných elementů platí.

$$S_1 = \pi \cdot d_1 \cdot 2 \cdot h_p = \pi \cdot 0,046 \cdot 2 \cdot 0,05 = 0,014 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Pro část odkrytého těla válce extrudéru platí.

$$S_2 = \pi \cdot d_2 \cdot (l_0 - 2 \cdot h_p) = \pi \cdot 0,05 \cdot (0,3 - 0,05 \cdot 2) = 0,025 \text{ m}^2 \quad (17)$$

Pro tepelný tok záření platí.

$$\begin{aligned}
 Q_z &= \sigma_0 \cdot [\varepsilon_1 \cdot S_1 \cdot (T_1^4 - T_3^4) + \varepsilon_2 \cdot S_2 \cdot (T_2^4 - T_3^4)] = \\
 &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [0,11 \cdot 0,014 \cdot (353,15^4 - 295,15^4) \\
 &\quad + 0,06 \cdot 0,025 \cdot (348,15^4 - 295,15^4)] = 1,33 \text{ W}
 \end{aligned} \quad [34] \quad (18)$$

Je vidět, že záření nemá přílišný vliv na ztrátu tepla. Lesklý povrch kovů a nízká teplota jsou důvodem nízké tepelné ztráty zářením.

Vedení

Při výpočtu tepla konvekcí dojde k rozdělení extrudéru na dvě části, stejně jako u záření.

Nejprve je třeba zjistit hodnotu součinitele přestupu tepla α . Místo řešení komplikované diferenciální rovnice se k řešení používá takzvaná teorie podobnosti, kdy se součinitel dopočítává z podobnostních čísel, které jsou stanoveny pro některé základní geometrické uspořádání [34]. Toto řešení není zcela přesné, protože v rámci převádění sestavy na známé geometrické tvary dochází ke zjednodušování.

$$\gamma_1 = \frac{2}{T_1 + T_3} = \frac{2}{353,15 + 295,15} = 3,09 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad [34] \quad (19)$$

$$\gamma_2 = \frac{2}{T_2 + T_3} = \frac{2}{348,15 + 295,15} = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad [34] \quad (20)$$

Grasthofovo číslo [34].

$$\begin{aligned} G_{r1} &= \frac{g \cdot \gamma_1 \cdot (T_1 - T_3) \cdot (2 \times h_p)^3}{v_v^2} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 3,09 \cdot 10^{-3} \cdot (353,15 - 295,15) \cdot (2 \times 0,05)^3}{0,00001856^2} \quad [34] \quad (21) \\ &= 5,13 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{r2} &= \frac{g \cdot \gamma_2 \cdot (T_2 - T_3) \cdot (l_0)^3}{v_v^2} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 3,11 \cdot 10^{-3} \cdot (348,15 - 295,15) \cdot (0,3)^3}{0,00001856^2} \quad [34] \quad (22) \\ &= 1,27 \cdot 10^8 \end{aligned}$$

Pro Nusseltovo číslo platí [34].

$$N_{u1} = C \cdot G_{r1}^m \cdot Pr^n = 0,023 \cdot (5,13 \cdot 10^6)^{0,5} \cdot 0,71^{0,4} = 45,4 \quad [34] \quad (23)$$

$$N_{u2} = C \cdot G_{r2}^m \cdot Pr^n = 0,023 \cdot (1,27 \cdot 10^8)^{0,5} \cdot 0,71^{0,4} = 225,7 \quad [34] \quad (24)$$

Součinitel přestupu tepla odpovídá [34].

$$\alpha_1 = \frac{N_{u1} \cdot \lambda}{2 \cdot h_p} = \frac{45,26 \cdot 0,028}{2 \cdot 0,05} = 12,7 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-2} \quad [34] \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \frac{N_{u2} \cdot \lambda}{l_0} = \frac{225,7 \cdot 0,028}{0,3} = 21,1 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-2} \quad [34] \quad (26)$$

Pro tepelný tok konvekce píšeme [34].

$$\begin{aligned} Q_k &= S_1 \cdot \alpha_1 \cdot (T_1 - T_3) + S_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_2 - T_3) = \\ &= 0,0176 \cdot 12,7 \cdot (353,15 - 295,15) + 0,0236 \cdot 21,1 \cdot (348,15 - 295,15) = \\ &= 38,7 \text{ W} \end{aligned} \quad [34] \quad (27)$$

Celkové ztráty

Celkový ztrátový tepelný tok odpovídá.

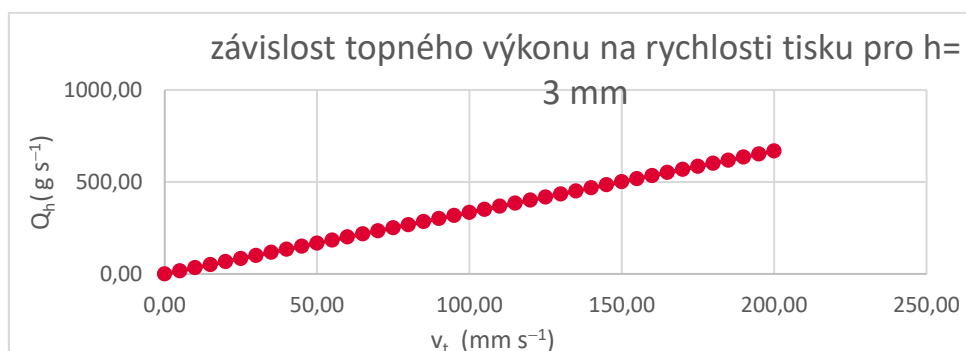
$$Q_l = Q_z + Q_k = 1,32 + 38,7 = 40,05 \text{ W} \quad (28)$$

Potřebný výkon topných elementů

$$Q_c = Q_h + Q_l = 167 + 39,7 = 241 \text{ W} \quad (29)$$

Při stanoveném průtoku je třeba dodávat 241 W tepla. V této hodnotě však není započítáno latentní teplo potřebné k fázové přeměně hlíny. Víme, že amorfnní látky nemají pevně stanovenou teplotu tání a latentní teplo se dodává v širším rozsahu teplot. Bohužel latentní teplo hlíny není udáváno, tak jej nelze jednoduše započítat. K dispozici jsou dva topné pásy SMN40D50B od firmy Easytherm, každý o výkonu 350 W. Bude třeba použít obě spirály, aby se prodloužila topná oblast. Pásy pracují na plný výkon pouze když se zahřívají na maximální teplotu 350°C. Při použití spirál při teplotách okolo 80 °C budou pracovat pouze na částečný výkon a jejich použití se nedá označit za předimenzování. [36].

K regulaci těchto pásů slouží PID regulátor N1040 [37].



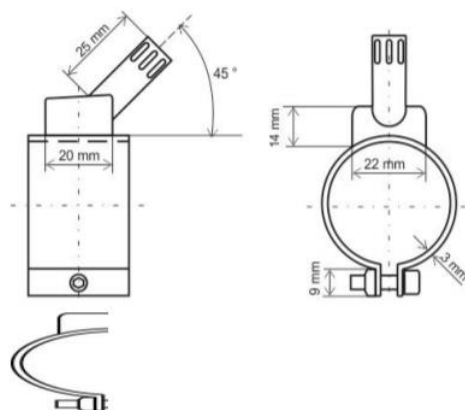
obr. 4-7 Závislost topného výkonu na rychlosti tisku pro h = 3 mm

4.1.8 Topné spirály

Topné pásy řady SMN jsou vyrobeny z mosazi se slídovou izolací. V pásu je integrovaný termočlánek typu J [36].

Tabulka 5-1 Topné spirály [36]

Veličina	hodnota
výkon	350W [36]
průměr	40mm [36]
max.teplota	350°C) [36]
šířka	50 [36]



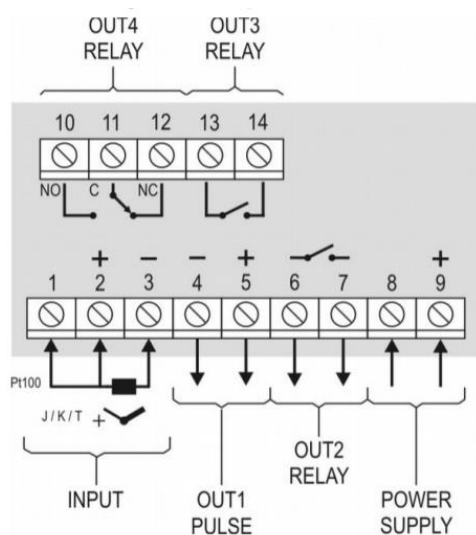
obr. 4-8 Schéma topného pásu [36]

4.1.9 Regulátor N1040

Regulátor je vybavený jedním vstupem, ke kterému je možné připojit termočlánek typu K, J, T nebo teplotní čidlo Pt100. Teplotní rozsah termočlátku typu J je $(-110 \div 950) ^\circ\text{C}$ [37].

tab. 4-2 Výstupy [37]

Výstupy	
výstup 1	napěťový pulzní výstup, 5 Vss, max. 25 mA (pro ovládání SSR) [37]
výstup 2	relé, spínací, max. 240 Vst/30 Vss, max. 1,5 A (odporová zátěž) [37]
výstup 3	relé, spínací, max. 240 Vst/30 Vss, max. 1,5 A (odporová zátěž) [37]
výstup 4	relé, přepínací, max. 240 Vst/30 Vss, max. 3 A (odporová zátěž) [37]



obr. 4-9 Schéma zapojení regulátoru [37]

4.1.10 Pokus měření síly

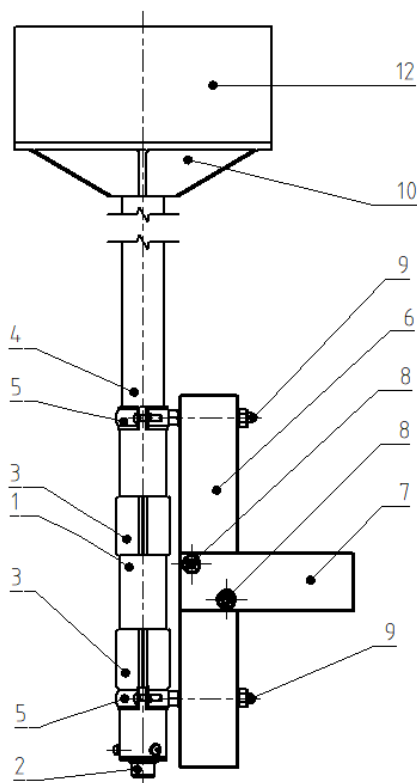
Vytvoření přesného výpočtového modelu vedení tepla v extrudéru je závislé na několika termodynamických konstantách, které bohužel nejsou výrobcem zveřejněny.

Místo měření těchto konstant je možné provést pokus s měřením rozložení teplot přímo na extrudéru. Vhodným nastavením teplot obou spirál a jejich umístěním na těle extrudéru je možné určit správnou délku extrudéru a teploty pro optimální tiskové podmínky.

Mezi další výsledky pokusu patří zjištění potřebné síly pro posuv materiálu extrudérem.

4.1.11 Konstrukce aparatury

Aparatura je v podstatě extrudér bez pohybového mechanismu, ten je nahrazen nádobou, pro ukládání závaží. Postupným přidáváním závaží lze určit, jaká síla je třeba k rozpohybování hmoty v extrudéru a jejímu posuvu skrz trysku.



obr. 4-10 Náskres aparatury

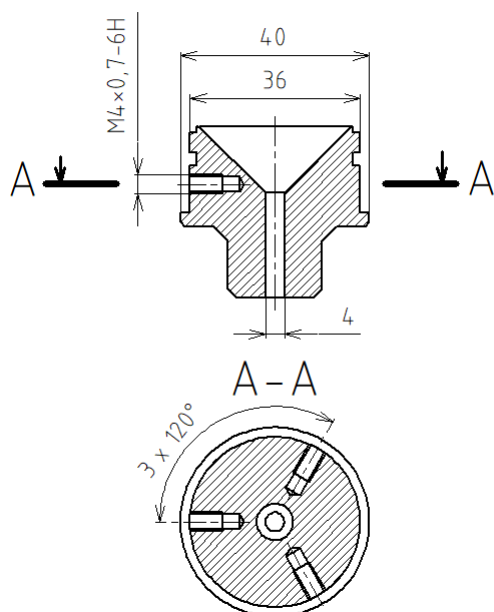
Odkazy platí k obrázku 4-10. Základním článkem aparatury je trubka (1) tvořící tělo extrudéru. Její průměr je určen podle vnitřního průměru topných pásů (3). Pro experiment bude její počáteční délka zvolena. Podle výsledků je možné tento rozměr upravit.

$d = 40\text{mm}$ vnější průměr trubky těla extruderu

$l = 300\text{mm}$ počáteční délka válce

Ve spodní části aparatury trubka ústí v trysku (2). Horní část trysky, která je zapuštěna v trubce, má zužující vnitřní kónus, sloužící k usnadnění pohybu materiálu tryskou. Z vnější strany je tryska vybavena těsnícím O kroužkem PN 02 9281,2 Rubena-32 × 2.

Tryska je připojena k trubici pomocí 3 šroubů ISO 4762 M4 - 4,8 , které jsou zašroubovány do závitů M4 × 0,7 vyvrtaných přímo v těle trysky. Tryska je vyrobena pomocí třískového obrábění z hliníku.



obr. 4-11 Náčrt trysky

Topné elementy (2) jsou přitaženy na tělese trubky. Po povolení 4 šroubů je možno s nimi pohybovat a upravovat polohu.

Na horní podstavu hliněného válce je nasazený tzv. talíř (10), který spojuje hliněný válec (4) s nádobou na závaží (11). Talíř je zhotoven 3D tiskem z ABS.

Rám je konstrukce, která má za úkol držet celou aparaturu ve vertikální poloze připevněnou na okraji stolu. Skládá se ze tří nosníků. Hlavní část tvoří opěra (6) a dvě podpěry (7). Celý rám je pospojován pomocí dvou závitových tyčí M8 × 1,25 (8).

$l_{s1} = 150 \text{ mm}$ délka spojovací závitové tyče

Spojení rámu se zbytkem aparatury je provedeno pomocí dvou dvoudílných topenářských objímek (5) pro rozměry trubky 31-38. Po odstranění izolační gumy, , má objímka vnitřní průměr 50 mm a je vhodná k upnutí extruderu. K zadnímu dílu objímky je přitažen maticí, která je pomocí upevňovací závitové tyče (9) dotažena k rámu.

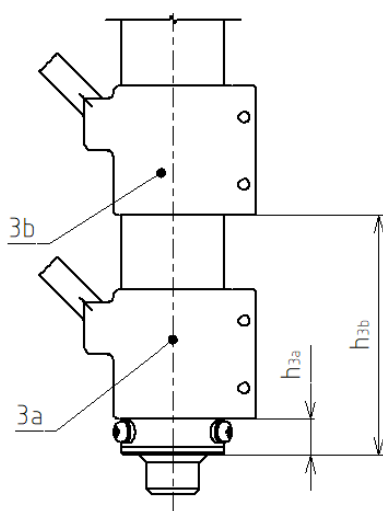
$l_{s2} = 75 \text{ mm}$ délka upevňovací závitové tyče

4.1.12 Způsob realizace pokusu

Hlavním cílem pokusu je naměřit závislost výšky válce na čase.

Výška válce se měří, aby bylo možné stanovit, jaké množství materiálu extrudérem při dané zátěži proudí, jaká je rychlost a jaké je zrychlení průtoku. Měření probíhá odečítáním okamžité výšky podstavy talíře vzhledem k metru upevněnému za aparaturou (obr. 4-10). Každou 1 minutu je odečtena výška válce.

Pokus je zahájen až v čase, kdy se ustálí teplotní pole na povrchu trubky. Tento čas je možné změřit. Pokus je rozdělen na 4 rozložení, každé s jiným rozložením topných pásů a jiným nastavením teploty.



obr. 4-12 rozložení topných pásů

Rozložení 1

Oba topné pásy (obr. 4-12) (3a) (3b) jsou nasazeny na spodním okraji trubky extruderu, přímo za šrouby držícími trysku, tedy ve vzdálenosti $h_{3a} = 10,5$ mm a $h_{3b} = 80,5$ mm od plochy trysky. Mezera o velikosti 20 mm mezi pásy je ponechána pro upínací objímku. Teplota obou topných spirál je nastavena na stejnou hodnotu $t_{3a} = t_{3b} = 78^{\circ}\text{C}$.

Rozložení 2

Spodní topný pás (3a) bude umístěn na začátku trubice ve vzdálenosti $h_{3a} = 100$ mm, druhý topný pás (3b) bude umístěn asi ve 2/3 trubice. ve vzdálenosti $h_{3b} = 170$ mm. Teplota obou topných spirál je nastavena na stejnou hodnotu $t_{3a} = t_{3b} = 95^{\circ}\text{C}$.

Rozložení 3

Spodní topný pás (3_a) bude umístěn na začátku trubice ve vzdálenosti $h_{3a} = 100$ mm, druhý topný pás (3_b) bude umístěn asi ve 2/3 trubice. ve vzdálenosti $h_{3b} = 170$ mm. Teplota obou topných spirál je nastavena na stejnou hodnotu $t_{3a} = t_{3b} = 110^\circ\text{C}$.

Rozložení 4

Spodní topný pás (3_a) bude umístěn na začátku trubice ve vzdálenosti $h_{3a} = 50$ mm, druhý topný pás (3_b) bude umístěn asi ve 2/3 trubice. ve vzdálenosti $h_{3b} = 150$ mm. Teplota obou topných spirál je nastavena na stejnou hodnotu $t_{3a} = t_{3b} = 120^\circ\text{C}$.

Jako závaží slouží voda, která je přilévána do nádoby o objemu 5 l upevněné na hliněném válci podle kapitoly (4.1.11). Voda bude přilévána po 0,5 l, dokud nedojde k uvolnění válce, poté bude měření provedeno pro několik bodů při tomto zatížení.

4.1.13 Realizace pokusu

Pro rozložení 1

Toto rozložení se ukázalo jako nerealizovatelné. Teplota spirál 78°C je příliš nízká, aby dokázala materiál efektivně ohřát. Rozdíl mezi teplotou válce a teplotou spirál je nízký. Topné spirály se dostanou na teplotu příliš rychle, pak se vypnou a nedodávají žádné teplo, dokud se materiál lehce neochladí a spirála nesepe. Materiál ani po 20 minutách není možné vytlačit pomocí zatížení, které aparatura umožňuje, tedy 50 N.

Pro rozložení 2, 3, 4

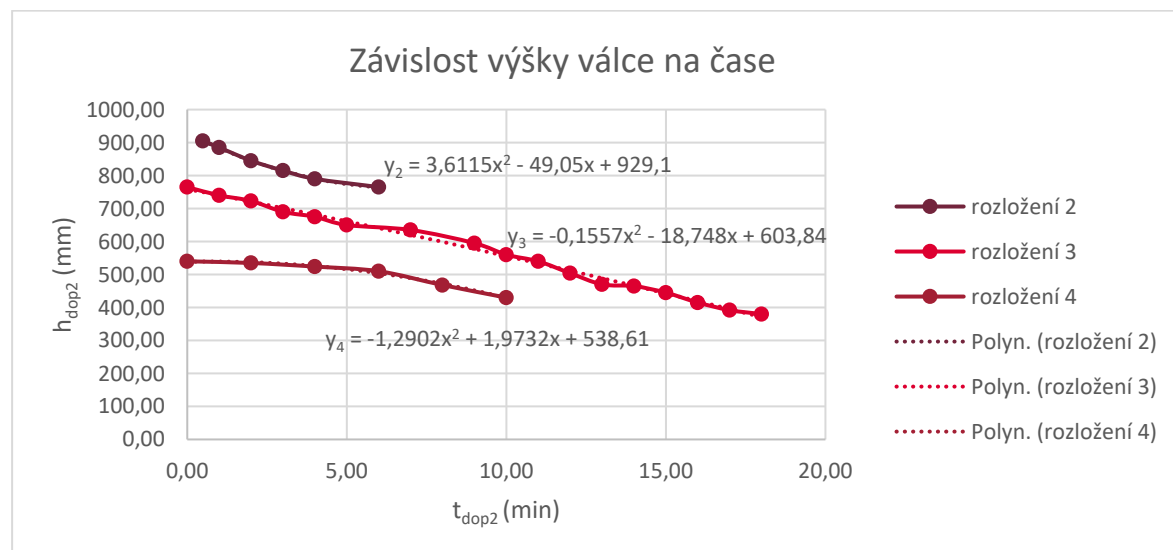
Při těchto rozloženích se po 20 minutách nahřívání materiál začal uvolňovat, bohužel až při užití závaží o hmotnosti 3,4 kg a vyšší.

$t_{r2} = 95^\circ\text{C}$	teplota topných spirál
$m_{zav2} = 3,4$ kg	hmotnost závaží 2
$m_{zav3} = 4$ kg	hmotnost závaží 3
$m_{zav4} = 4$ kg	hmotnost závaží 4
$m_{nad} = 0,17$ kg	hmotnost nádoby
$S_h = 1017$ mm ²	obsah hliněného válce
$h_{dop2} =$ mm	skutečná výška válce hlíny
$t_{dop2} =$ min	skutečná doba zatěžování
$a_{dop2} =$ mm min ⁻²	dopočítané zrychlení

$v_{dop2} = \text{mm min}^{-1}$ dopočítaná rychlost
 $F_{02} = \text{N}$ odporová síla při zatížení

tab. 4-3 Výsledky pokusu při rozložení 3, 4, 5

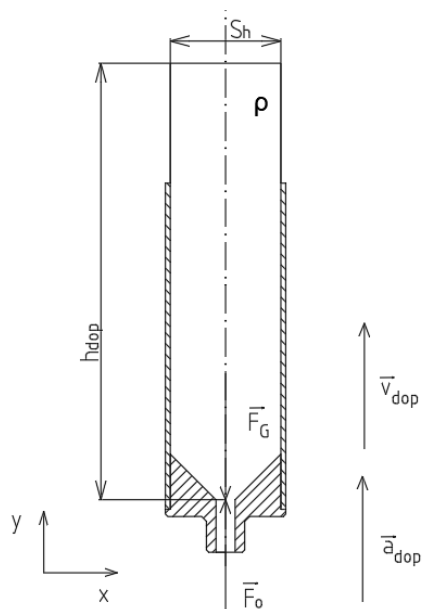
t_{dop2} (min)	h_{dop2} (mm)	t_{dop3} (min)	h_{dop3} (mm)	t_{dop4} (min)	h_{dop4} (mm)
0,49	905,00	0,00	765,00	0,00	540,00
1,00	885,00	1,00	740,00	2,00	535,00
2,00	845,00	2,00	723,00	4,00	524,00
3,00	815,00	3,00	690,00	6,00	510,00
4,00	790,00	4,00	675,00	8,00	468,00
6,00	765,00	5,00	650,00	10,00	430,00
-	-	7,00	635,00	-	-
-	-	9,00	595,00	-	-
-	-	10,00	560,00	-	-
-	-	11,00	540,00	-	-
-	-	12,00	504,00	-	-
-	-	13,00	470,00	-	-
-	-	14,00	465,00	-	-
-	-	15,00	445,00	-	-
-	-	16,00	415,00	-	-
-	-	17,00	392,00	-	-
-	-	18,00	380,00	-	-



obr. 4-13 Závislost výšky válce na čase

Závislosti výšky na čase byly vykresleny do grafu a proloženy kvadratickou rovnicí.

$$h_{dop2} = 3,6115 \cdot t_{dop2}^2 - 49,05 \cdot t_{dop2} + 774,1 \quad (30)$$



obr. 4-14 Náčrt silového působení pro vyhodnocení experimentu

Směry rychlosti jsou voleny záměrně ve směru osy y, aby měli stejnou orientaci jak dráha. Pokud bude rychlost či zrychlení směřovat dolů, bude hodnota záporná.

Rovnice 30 se dá brát jako závislost dráhy na čase. Její derivací je možné získat rovnici pro rychlost a pro zrychlení.

$$v_{dop2} = \frac{dh_{dop2}}{dt_{dop2}} = 2 \cdot 3,6115 \cdot t_{dop2} - 49,05 \quad (31)$$

Zrychlení je časovou derivací rychlosti.

$$a_{dop2} = \frac{dv_{dop2}}{dt_{dop2}} = 2 \cdot 3,6115 \quad (32)$$

Hmotnosti jsou dopočteny pro jednotlivé naměřené body.

$$\begin{aligned} m_{dop2} &= m_{nád} + m_{záv2} + h_{dop2} \cdot S_h \cdot \rho \\ &= 0,17 + 3,4 + 0,905 \cdot 0,0001 \cdot 1170 = 4,82 \text{ kg} \end{aligned} \quad (33)$$

Odporovou sílu působí proti pohybu válce. Jedná se o zatěžovací sílu navýšenou o sílu vyvolanou zrychlením (34).

$$F_{O2} = m_{dop2} \cdot (g + a_{dop2}) = 4,82 \cdot \left(9,81 + \frac{7,22}{3600 \cdot 1000} \right) = 47,27 \text{ N} \quad (34)$$

Obdobné řešení je použito pro všechna body a všechny rozložení.



obr. 4-15 Tok hlíny při rozložení 3

tab. 4-4 Dopočítané hodnoty rozložení 2

t_{dop2} (min)	h_{dop2} (mm)	v_{dop2} (mm/min)	a_{dop2} (mm/min ²)	m_{dop2} (kg)	F_{O2} (N)
0,49	905,00	-45,51	-7,22	4,51	44,21
1,00	885,00	-41,83	-7,22	4,49	44,00
2,00	845,00	-34,60	-7,22	4,44	43,60
3,00	815,00	-27,38	-7,22	4,41	43,29
4,00	790,00	-20,16	-7,22	4,39	43,04
6,00	765,00	-5,71	-7,22	4,36	42,79

tab. 4-5 Dypočítané hodnoty rozložení 3

t_{dop3} (min)	h_{dop3} (mm)	v_{dop3} (mm/min)	a_{dop3} (mm/min)	m_{dop3} (kg)	F₀₃ (N)
0,00	765,00	-18,75	-0,31	5,08	49,85
1,00	740,00	-19,06	-0,31	5,05	49,55
2,00	723,00	-19,37	-0,31	5,03	49,35
3,00	690,00	-19,68	-0,31	4,99	48,97
4,00	675,00	-19,99	-0,31	4,97	48,79
5,00	650,00	-20,31	-0,31	4,94	48,50
7,00	635,00	-20,93	-0,31	4,93	48,33
9,00	595,00	-21,55	-0,31	4,88	47,86
10,00	560,00	-21,86	-0,31	4,84	47,45
11,00	540,00	-22,17	-0,31	4,81	47,22
12,00	504,00	-22,48	-0,31	4,77	46,80
13,00	470,00	-22,80	-0,31	4,73	46,40
14,00	465,00	-23,11	-0,31	4,72	46,34
15,00	445,00	-23,42	-0,31	4,70	46,11
16,00	415,00	-23,73	-0,31	4,66	45,76
17,00	392,00	-24,04	-0,31	4,64	45,49
18,00	380,00	-24,35	-0,31	4,62	45,35

tab. 4-6 Dypočítané hodnoty rozložení 4

t_{dop4} (min)	h_{dop4} (mm)	v_{dop4} (mm/min)	a_{dop4} (mm/min²)	m_{dop4} (kg)	F₀₄ (N)
0,00	540,00	1,97	-2,58	4,81	47,22
2,00	535,00	-3,19	-2,58	4,81	47,16
4,00	524,00	-8,35	-2,58	4,79	47,03
6,00	510,00	-13,51	-2,58	4,78	46,87
8,00	468,00	-18,67	-2,58	4,73	46,38
10,00	430,00	-23,83	-2,58	4,68	45,93

Volba rozložení

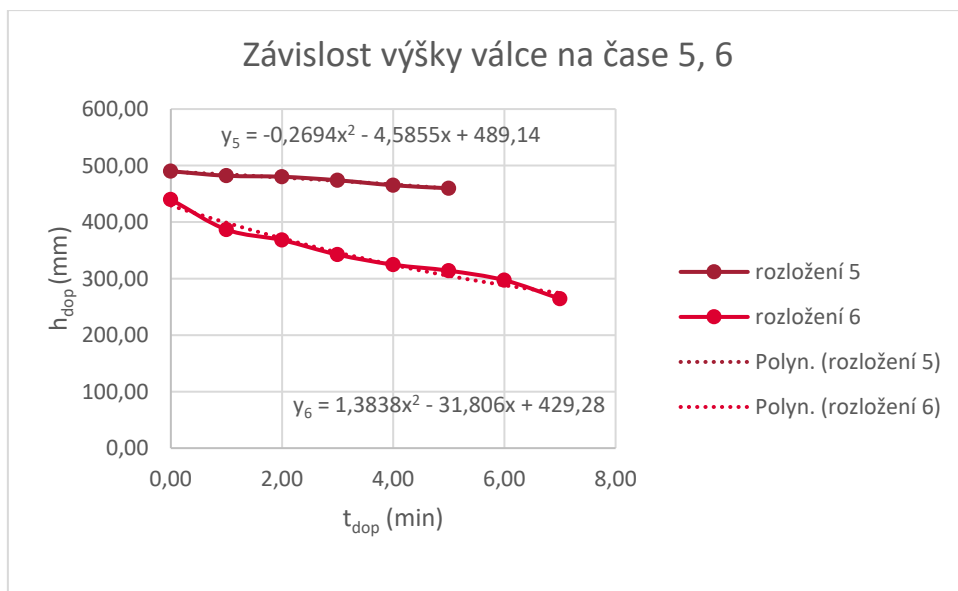
Znaménko minus u rychlosti a zrychlení značí, že se materiál pohyboval v záporném směru osy y. Válec se zkracoval, nikoliv prodlužoval. Při rozložení 2 se materiál nestíhal dohřívát a tok materiálu se v průběhu zastavil. Rozložení 4 byl materiál příliš řídký. Na stěnách se materiál roztavil, ale jádro zůstalo tuhé a ucpávalo trysku. Z výsledků plyne, že nejlepších výsledků se dosáhlo při rozložení 3, tedy při teplotě 110°C. Materiál nebyl příliš řídký (obr. 4-15) jako při teplotě 120°C. Výnos materiálu byl vcelku stabilní a nedocházelo k zasekávání extrudéru nenataveným materiálem. Bohužel rychlosti posuvu válce se pohybovaly pouze v rámci 18-25 mm/min. Pro požadované rychlosti tisku je tato hodnota takřka třetinová, než by bylo potřeba. Zkrátka se do trubice nepodařilo dodat dostatečné množství energie.

Pro rozložení 5, 6

Tato rozložení vycházejí z rozložení 3, které doposud dalo nejlepší výsledky. Teplota spirál byla nastavena na 110°C. Válec byl dodatečně zaizolován skelnou vatou, aby se zjistilo, zda izolace zlepši natavování hlíny. Zatížení odpovídalo 2 kg pro rozložení 5 a 5,8 kg pro rozložení 6.

tab. 4-7 Výsledky pokusu pro rozložení 5

t_{dop5} (min)	h_{dop5} (mm)	t_{dop6} (min)	h_{dop6} (mm)
0,00	490,00	0,00	440,00
1,00	482,01	1,00	386,76
2,00	480,24	2,00	368,13
3,00	474,03	3,00	342,40
4,00	465,16	4,00	324,65
5,00	459,83	5,00	314,00
-	-	6,00	297,14
-	-	7,00	264,31



obr. 4-16 Závislost výšky válce na čase rozložení 5,6

Způsob vyhodnocování opět odpovídá řešení pro rozložení 3, 4, 5.

tab. 4-8 Dopočítané hodnoty rozložení 5

t_{dop5} [min]	h_{dop5} [mm]	v_{dop5} [mm/min]	a_{dop5} [mm/min ²]	m_{dop5} [kg]	F_{05} [N]
0,00	490,00	-4,59	-0,54	2,75	27,01
1,00	482,01	-5,12	-0,54	2,74	26,92
2,00	480,24	-5,66	-0,54	2,74	26,90
3,00	474,03	-6,20	-0,54	2,73	26,83
4,00	465,16	-6,74	-0,54	2,72	26,72
5,00	459,83	-7,28	-0,54	2,72	26,66

tab. 4-9 Dopočítané hodnoty rozložení 6

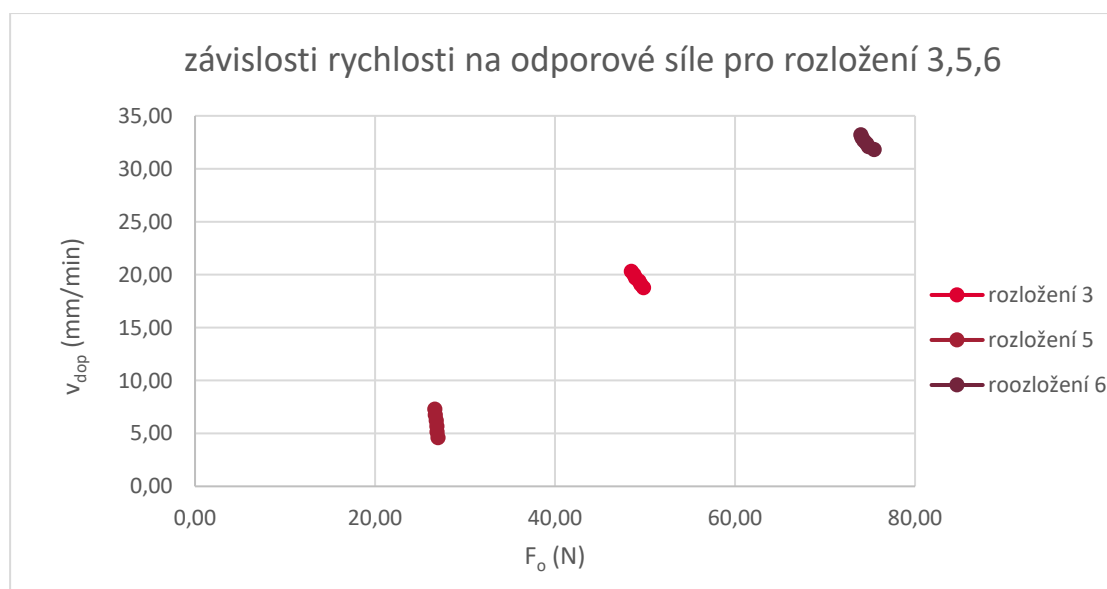
t_{dop6} [min]	h_{dop6} [mm]	v_{dop6} [mm/min]	a_{dop6} [mm/min ²]	m_{dop6} [kg]	F_{06} [N]
0,00	440,00	-31,81	-2,77	7,69	75,48
1,00	386,76	-32,08	-2,77	7,63	74,86
2,00	368,13	-32,36	-2,77	7,61	74,64
3,00	342,40	-32,64	-2,77	7,58	74,34
4,00	324,65	-32,91	-2,77	7,56	74,13
5,00	314,00	-33,19	-2,77	7,54	74,01
6,00	297,14	-33,47	-2,77	7,52	73,81
7,00	264,31	-33,74	-2,77	7,48	73,43

Nízké zatížení při rozložení 5 znamená i nízkou rychlost. Izolace skutečně způsobuje lepší prohřívání materiálu, protože konzistence extrudovaného materiálu spíše odpovídá chování při teplotě 120 °C. Vyšší zatížení při rozložení 6 znamenalo i zvýšení výtokové rychlosti. Bohužel materiál byl příliš tekutý (obr. 4-17), aby se z něj dalo efektivně tisknout. U obou rozložení se vyskytuje problém kolísání mezi zacpáváním trysky tužším jádrem a rychlým výtokem příliš tekuté hlíny.



obr. 4-17 Vytečená hlína hlíny při rozložení 5 a 6

4.1.14 Vyhodnocení výsledků



obr. 4-18 Závislosti rychlosti na odporové síle pro rozložení 3,5,6

Závislost (obr. 4-18) ukazuje, že z globálního hlediska se rychlost výtoku při konstantním nastavení teploty s rostoucí silou zvětšuje. Poklesy jednotlivých křivek způsobuje vedení tepla i do částí válce mimo topnou zónu. Tento jev je nežádoucí, protože pokud bude materiál v podavači příliš měkký, tak se válečky podavače zaboří do hlíny a nebudou fungovat. Tento problém je třeba řešit chlazením válce na jeho vstupu do trubice.

4.1.15 Teplotní profil

Na obrázku (obr. 4-19) je možné vidět, jak vypadal válec materiálu po vytažení z topného válce. Je vidět, že má konický tvar, což způsobilo odtávání materiálu po stěnách, zatímco se jádro neprohřálo.



obr. 4-19 Zbytek válce vytažený z extrudéru po ukončení pokusu 4

Pomocí aplikace AutoCAD byl změřen úhel kónusu a dopočítána potřebná délka válce, aby došlo k natavení celého průřezu materiálu.

$d_h = 36 \text{ mm}$ vnější průměr trubky těla extrudéru

$l_o = 300 \text{ mm}$ počáteční délka válce

$\alpha_v = 1,8^\circ$ vnější průměr trubky těla extrudéru

Dopočtená délka válce, aby se natavil materiál v celém průřezu.

$$l_t = \frac{d}{2 \cdot \tan(\alpha_v)} = \frac{36}{2 \cdot \tan(1,8^\circ)} = 573 \text{ mm} \quad (35)$$

V případě, že chceme zachovat délku válce, ale požadujeme natavení celého průřezu, je třeba průměr zmenšit na hodnotu.

$$d_{h2} = l_o \cdot 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_v) = 2 \cdot 300 \cdot \operatorname{tg}(1,8^\circ) = 18,9 \text{ mm} \quad (36)$$

Dopočítané hodnoty ukazují, že je trubici třeba prodloužit nebo zúžit.

Prodloužení umožní zachovat podobnou dobu tisku na jeden válec. Na druhou stranu sebou nese zvýšení hmotnosti extrudéru a zvětšení procenta nevyužitého materiálu. Větší plocha znamená větší ztráty a nerovnoměrné rozložení teplot ve válci.

Při zúžení trubice bude hmotnost extrudéru nižší, ale bude třeba často měnit tiskové válce. Toto řešení sníží tepelné ztráty v důsledku zmenšení plochy válce, nicméně je třeba zvolit jiné topné spirály, než byly zadány.

4.2 Tisk z taveniny pomocí pístu

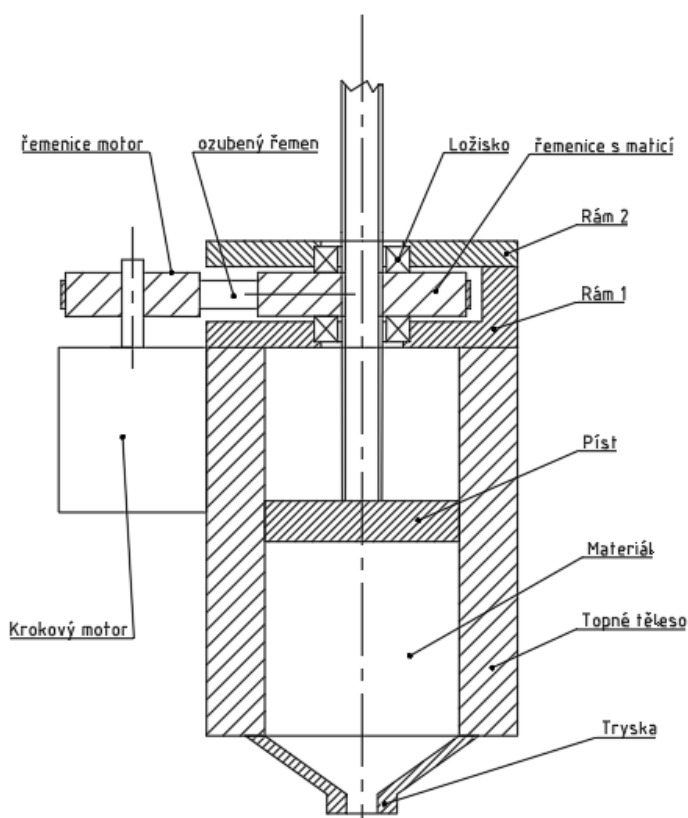
Tento návrh spočívá v tom, že nad extrudérem se bude udržovat nádoba s předehřátou hlinou uzavřená pístem. Píst bude regulovat průtok materiálu. Píst může být poháněn pomocí šroubu a servomotoru, nebo stlačeným vzduchem. Metoda se šroubem je sice náročnější, ale není potřeba vzduchového systému s kompresorem. Celý šroubový mechanismus musí být snadno odnímatelný pro možnost výměny zásobníku materiálu.

Výhody:

- Konstrukční jednoduchost.
- Přesnější regulace průtoku.
- Možnost vytlačet materiál o vysoké viskozitě.

Nevýhody:

- Hlavní nevýhodou je zdlouhavá výměna zásobníku materiálu.
- Pomalá regulace teploty díky potřebě nahřát velké množství materiálu.
- Nutnost předehřevu materiálu v peci, jinak dlouhé časové intervaly na zahřátí hlíny.



obr. 4-20 Schéma návrhu tisku z taveniny

4.2.1 Měření zatížení při teplotě 80°C

V tomto pokusu je užito stejné aparatury podle kapitoly (4.1.11). Liší se pouze drobnými změnami. Materiál je nalitý přímo v trubici s tryskou a jako píst je použita užší trubice zaslepena kartonovou záslepkou. Celá trubice je v peci předehřata na 80°C po dobu 30 minut. Následně je aplikováno zatížení a měřena rychlost výtoku, v tomto případě je aplikován odlišný způsob měření než v kapitole (4.1.12). Místo výšky válce je měřena hmotnost vytečeného materiálu. Hodnota je odečtena každých 30 sekund. Zatížení se zvyšuje po jednom kilogramu.

$t_{r7} = 80^{\circ}\text{C}$	teplota topných spirál
$\rho = 1170 \text{ kgm}^{-3}$	teplota topných spirál
$h_{\text{poč}71} = 300 \text{ mm}$	počáteční výška 71
$h_{\text{poč}72} = 296 \text{ mm}$	počáteční výška 72
$m_{\text{záv}71} = 2 \text{ kg}$	hmotnost závaží 71
$m_{\text{záv}72} = 3 \text{ kg}$	hmotnost závaží 72
$m_{\text{nád}} = 0,27 \text{ kg}$	hmotnost nádoby na závaží
$S_h = 1017 \text{ mm}^2$	obsah hliněného válce

$h_{dop} = \text{mm}$	skutečná výška válce hlíny
$t_{dop} = \text{min}$	skutečná doba zatěžování
$a_{dop} = \text{mm/min}^2$	dopočítané zrychlení
$v_{dop} = \text{mm/min}$	dopočítaná rychlost
$F_o = \text{N}$	odporová síla při zatížení 2

tab. 4-10 Výsledky pokusu pro rozložení 71

t_{dop71} [min]	m_{dop71} [g]	h_{dop71} [mm]
0,00	0,00	300,00
0,50	0,70	299,39
1,00	1,40	298,78
1,50	2,80	297,56
2,00	4,30	296,25

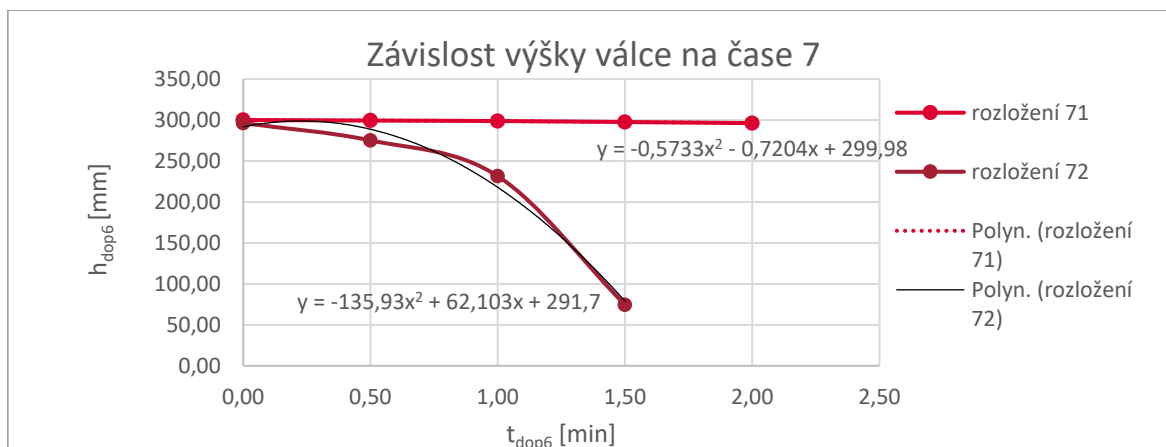
tab. 4-11 Výsledky pokusu pro rozložení 72

t_{dop72} [min]	m_{dop72} [g]	h_{dop72} [mm]
0,00	4,30	296,25
0,50	28,50	275,13
1,00	78,50	231,51
1,50	258,50	74,46

Nejprve je třeba z naměřené hmotnosti dopočítat výšku válce.

$$h_{dop71} = h_{poc71} - \frac{m_{dop71}}{\rho \cdot S_h} = 300 - \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{1170 \cdot 1,017 \cdot 10^{-3}} = 299,4 \text{ mm} \quad (37)$$

Závislost výšky na čase byla vykreslena do grafu a proložena kvadratickou rovnicí.



obr. 4-21 Závislost výšky válce na čase 7

Tyto rovnice je možné zpracovat jako v kapitole (4.1.13).

tab. 4-12 Dopočítané hodnoty rozložení 71

t_{dop71} [min]	m_{dop71} [g]	h_{dop71} [mm]	v_{dop71} [mm/min]	a_{dop71} [mm/min ²]	m_{dop71} [kg]	F_{071} [N]
0,00	0,00	300,00	-0,72	-1,17	2,63	25,77
0,50	0,70	299,39	-1,29	-1,17	2,63	25,77
1,00	1,40	298,78	-1,87	-1,17	2,63	25,76
1,50	2,80	297,56	-2,44	-1,17	2,62	25,75
2,00	4,30	296,25	-3,01	-1,17	2,62	25,73

tab. 4-13 Dopočítané hodnoty rozložení 72

t_{dop72} [min]	m_{dop72} [g]	h_{dop72} [mm]	v_{dop72} [mm/min]	a_{dop72} [mm/min ²]	m_{dop72} [kg]	F_{072} [N]
0,00	4,30	296,25	-62,10	-276,48	3,62	35,54
0,50	28,50	275,13	-198,03	-276,48	3,60	35,29
1,00	78,50	231,51	-333,96	-276,48	3,55	34,78
1,50	258,50	74,46	-469,89	-276,48	3,36	32,95

Znaménko minus u rychlosti a zrychlení značí, že má rychlost směr proti směru osy y. Válec se zkracoval, nikoliv prodlužoval. Jak je z výsledků patrné, tak síla 25 N nedokázala uvolnit materiál, ale silou 35 N zrychloval materiál dle zadaných parametrů na rychlosti vyšší, než v rámci tisku vyžadujeme. Rozhodně při tomto nastavení teploty materiálu je možné tisknout.

4.3 Výběr vhodné varianty

Z výsledků předchozích pokusů je patrné, že koncepční návrh tisku z bloku materiálu sebou nese celou škálu problémů. Z důvodu nízké tepelné vodivosti se materiál prohřívá pomalu a je třeba udělat dlouhou topnou zónu nebo zúžit extrudér. Prodloužení topné zóny zvýší hmotnost, množství nevyužitého materiálu a zhorší schopnost ovládání extrudéru. Výrazné zúžení bude mít za následek častější výměnu válců. Zvýšení síly, kterou budeme materiál tlačit, také výrazně nepomůže, protože bude docházet k jeho deformaci a porušování v místě kontaktu s rolnami (příloha 1).

Z těchto důvodů bylo vybráno řešení tisku pomocí pístu. Materiál se bude přehřívat v peci a z extrudéru bude vytlačěn pomocí pístu. Tato řeší většinu problémů prvního návrhu, ale zamezuje možnosti kontinuálního doplňování materiálu.

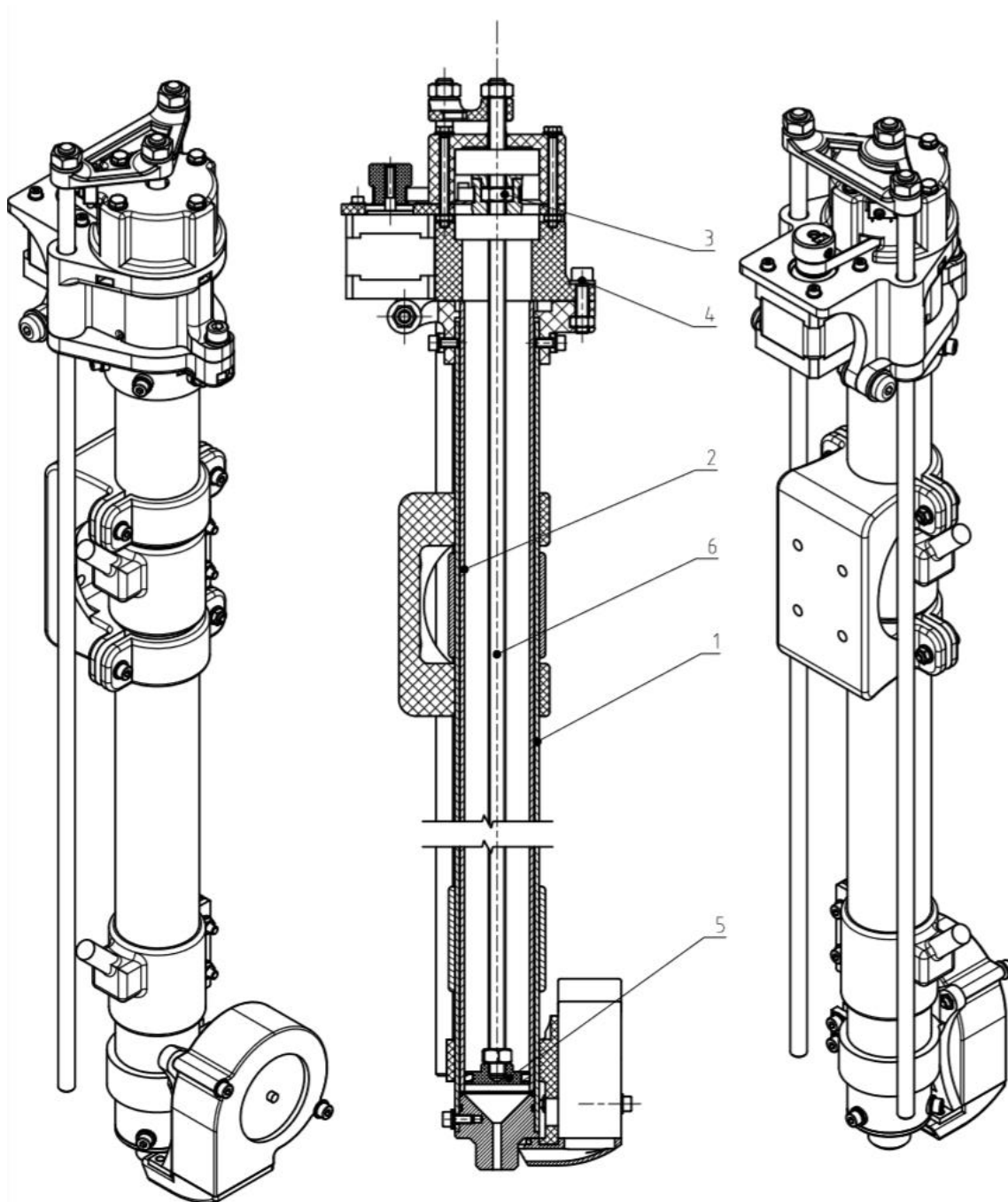
Problém zdlouhavé výměny se dá řešit tak, že materiál bude pro extrudér připravován do jakýchsi kapslí, které se v pístu jen jednoduše vymění. Jako kapsle mohou sloužit hliníkové trubičky, které se naplní hlinou a před použitím v extrudéru se nahřejí v již zmiňované peci.

Extrudér tedy bude tvořen dvěma válci. Vnější bude tvořit tělo extrudéru a bude k němu připevněno vše podstatné. Vnitřní ponese hliněnou náplň a bude vyměnitelný.

Výroba těchto kapslí je mnohem jednodušší než výroba tiskových válců.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Princip funkce extrudéru



obr. 5-1 Konstrukční řešení extrudéru

Šroub (obr. 5-1) (7) je pevně připojený k pístu (5) a rotační pohyb koná matice (3), čímž posouvá šroub v axiálním směru. Když vyjede píst do horní polohy, zarazí se o koncový spínač a zastaví se. V tuto chvíli je možné povolit zajišťovací šroubek (4) v přední části mechanismu pístu a odklopit jeho horní část. Prázdný válec od hlíny (2) se uvolní a je možné jej vytáhnout z válce tvořící tělo (1) a nahradit novým předeřtým na teplotu 80 °C. Poté se mechanismus pístu přiklopí a je možné spustit tisk. Až dojde píst na dno válce s hlínou, sepne se opačný koncový spínač. Tisk se zastaví a spustí se zpětný chod. Po dojetí k hornímu koncovému spínači se pohyb zastaví a je možné zopakovat výměnu materiálu.

Délka válce s hliněnou náplní se stanoví na 450 mm. Díly, které se nadají přímo koupit je možné vyrábět pomocí 3D tisku

5.2 Výpočty pístu

5.2.1 Přepočet rychlosti

Průtok odpovídá průtoku počítanému v kapitole (4.1.2).

Hodnoty rychlosti posuvu válce, času tisku a dalších proměnných jsou přepočítány pro

$d_h = 31 \text{ mm}$	průměr válce hlíny
$l_h = 450 \text{ mm}$	délka hliněného válce
$v_h = 0,884 \text{ mm s}^{-1}$	rychlost posuvu válce

Přepočet je proveden v (příloha 1).

5.2.2 Výpočet šroubu

$P_h = 1,25 \text{ mm}$	rozteč pohybového šroubu
$f_z = 0,1$	součinitel smykového tření ocel-mosaz
$\beta = 30^\circ$	úhel boku profilu
$F_o = 50 \text{ N}$	odporová síla
$d_z = 8 \text{ mm}$	velký průměr šroubu
$l_z = 550 \text{ mm}$	délka šroubu
$a_k = 0,25 \text{ mm}$	vůle ve šroubu
$v_h = 0,884 \text{ mm s}^{-1}$	rychlost posuvu válce

$N_{Mmin} = 50 \text{ min}^{-1}$ minimální otáčky motoru

Výška základního trojúhelníku.

$$H = 0,5 \cdot P_h \sqrt{3} = 0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,25 = 1,08 \text{ mm} \quad [38] \quad (38)$$

Střední průměr závitu se rovná

$$d_{z2} = d_z - 2 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot H \right) = 8 - 2 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot 1,08 \right) = 7,19 \text{ mm} \quad [38] \quad (39)$$

Malý průměr závitu

$$d_{z3} = d_z - P_h = 8 - 1,25 = 6,75 \text{ mm} \quad [38] \quad (40)$$

Malý průměr závitu matice

$$D_{z1} = d_z - 2 \cdot \left(\frac{5}{8} \cdot H \right) = 8 - 2 \cdot \left(\frac{5}{8} \cdot 1,08 \right) = 6,65 \text{ mm} \quad [38] \quad (41)$$

Malý průřez šroubu

$$S_{z3} = \pi \cdot \frac{d_{z3}^2}{4} = \pi \cdot \frac{6,75^2}{4} = 35,7 \text{ mm}^2 \quad [38] \quad (42)$$

Moment potřebný pro otáčení šroubu. Rovnice vychází z momentu potřebného pro zdvih břemene [38].

$$\begin{aligned} M_T &= \frac{F_o \cdot d_{z2}}{2} \cdot \left(\frac{P_h \cdot \cos(\beta) + \pi \cdot f_z \cdot d_{z2}}{\pi \cdot d_{z2} \cdot \cos(\beta) - P_h \cdot f_z} \right) \\ &= \frac{50 \cdot 7,19 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(\frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(30^\circ) + \pi \cdot 0,1 \cdot 7,19 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 7,19 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(30^\circ) - 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} \right) = \\ &= 0,031 \text{ Nm} \end{aligned} \quad [38] \quad (43)$$

Aby bylo možné dosáhnout předepsané rychlosti tisku, musí se matice otáčet rychlostí:

$$N_m = \frac{v_h}{P_h} = \frac{0,884}{1,25} = 0,95 \cdot \frac{1}{s} \quad (44)$$

Převodový poměr odpovídá

$$i = \frac{N_{Mmin}}{N_m} = \frac{50}{60 \cdot 0,95} = 0,875 \quad (45)$$

Zvolený počet zubu na pastorku

$z_1 = 20$ počet zubů na pastorku

Počet zubů na ozubeném kole

$$z_2 = i \cdot z_1 = 0,875 \cdot 20 = 17,5 \quad (46)$$

$$z_2 = 24$$

Výsledný převodový poměr je tedy.

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{24}{20} = 1,2 \quad (47)$$

Otáčky motoru dosahují hodnoty

$$N_M = N_m \cdot i = 0,95 \cdot 60 \cdot 1,2 = 68,68 \text{ min}^{-1} \quad (48)$$

Výkon motoru musí být alespoň

$$P_m = 2 \cdot \pi \cdot M_T \cdot N_M = 2 \cdot \pi \cdot 0,031 \cdot \frac{68,68}{60} = 0,222 \text{ W} \quad (49)$$

Potřebný moment motoru je tedy.

$$M_{Mot} = \frac{M_T}{i} = \frac{0,031}{1,2} = 0,026 \text{ Nm} \quad (50)$$

Pro potřeby extruderu je tedy zvolen krokový motor s přírubou Nemá 17 - 0,17 Nm.

5.2.3 Kontrola šroubu

I když je zatížení poměrně malé, je provedena kontrola šroubu vůči meznímu stavu vzpěru.

$d_{z3} = 6.75 \text{ mm}$ malý průměr závitu šroubu

$l_z = 550 \text{ mm}$ délka šroubu

$S_{z3} = 35,79 \text{ mm}^2$ průřez šroubu malý

$E_z = 207 \text{ GPa}$ modul pružnosti oceli šroubu

$R_{ez} = 240 \text{ Mpa}$ mez pevnosti oceli šroubu

$a_z = 1,2$ součinitel vazeb vetknutí - vetknutí

Kvadratický moment průřezu šroubu se vypočítá dle rovnice (52).

$$I_z = \frac{d_{z3}^4 \pi}{64} = \frac{(6,75 \cdot 10^3)^4 \cdot \pi}{64} = 1,02 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4 \quad [38] (51)$$

Pomocí kvadratického momentu je možné dopočítat štíhlost.

$$\lambda = \frac{l_z}{\sqrt[2]{\frac{I_z}{S_{z3}}}} = \frac{0,55}{\sqrt[2]{\frac{1,02 \cdot 10^{-10}}{3,578 \cdot 10^{-5}}}} = 325,93 \quad [38] (52)$$

Následně je třeba znát kritickou štíhlost [38].

$$\lambda_1 = \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot \alpha_z \cdot E_z}{R_{ez}} \right) = \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 3 \cdot 207 \cdot 10^9}{240 \cdot 10^6} \right) = 142,9 \quad [38] (53)$$

Pokud platí rovnice.

$$\lambda > \lambda_1$$

Pro kritickou rychlost.

$$F_{krit} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E_z \cdot I_z}{l_z} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 207 \cdot 10^9 \cdot 1,02 \cdot 10^{-10}}{0,55} = 876,274 \text{ N} \quad [38] (54)$$

Bezpečnost proti meznímu stavu vzpěru je tedy.

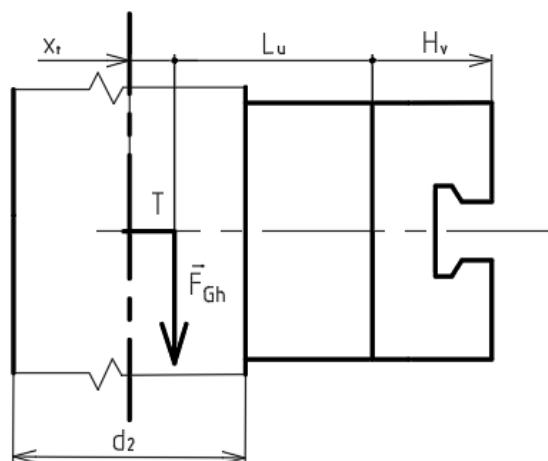
$$k_{vz} = \frac{F_{krit}}{F_o} = \frac{876,27}{50} = 17,5 \quad (55)$$

5.2.4 Doporučené uložení

Je třeba definovat parametry zatížení, které extrudér vyvolá a zvolit vhodné uložení k umístění extrudéru na rám tiskárny. Nejprve zkontrolujeme uložení TFA HGW-HC, kterým disponuje tiskárna ve Strojlabu, na které je možné extrudér vyzkoušet.

$m_{ex} = 3,041 \text{ kg}$	hmotnost celého extrudéru
$a_t = 3 \text{ m s}^{-2}$	zrychlení extrudéru
$H_v = 19,7 \text{ mm}$	šířka vozíku [39]
$x_T = 13 \text{ mm}$	souřadnice těžiště
$y_T = 250 \text{ mm}$	souřadnice těžiště
$C_{ov} = 25,31 \text{ kN}$	dynamická únosnost vozíku [39]

$M_R = 170 \text{ Nm}$	statický moment [39]
$M_P = 150 \text{ Nm}$	statický moment [39]
$M_y = 150 \text{ Nm}$	statický moment [39]
$d_2 = 40 \text{ mm}$	vnější průměr trubice
$L_u = 26 \text{ mm}$	vzdálenost od dosedací plochy lineárního vedení k trubici
$v_t = 0,05 \text{ ms}^{-1}$	tisková rychlost



obr. 5-2 Schéma zatížení vozíku tíhovou silou

Nyní je třeba dopočítat velikost tíhové síly v těžišti extrudéru.

$$F_g = (m_{ex} \cdot g) = (3,041 \cdot 9,81) = 29,83 \text{ N} \quad (56)$$

Moment vyvolaný touto silou vzhledem k patě vozíku.

$$\begin{aligned} M_g &= F_g \cdot \left(\frac{d_2}{2} - x_T + H_v + L_u \right) = \\ &= 29,83 \cdot \left(\frac{40}{2} - 13 + 19,7 + 26 \right) \cdot 0,001 = 1,28 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (57)$$

Ekvivalentní zatížení je.

$$\begin{aligned}
 P_E &= (m_{ex} \cdot g) + C_{0v} \cdot \frac{M_g}{M_R} + m_{ex} \cdot a_t = \\
 &= (3,04 \cdot 9,81) + 25,3 \cdot 10^3 \frac{1,34}{170} + 3,04 \cdot 3 = 229,2 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{39} \tag{58}$$

Pro výpočet jmenovitého zatížení je třeba dohledat součinitele.

$$f_h = 1 \quad \text{součinitel tvrdosti [39]}$$

$$f_t = 1 \quad \text{součinitel teploty [39]}$$

$$f_w = 1,5 \quad \text{součinitel zatížení (malé rázy) [39]}$$

Nyní je možné dopočítat jmenovitou životnost [39].

$$L_v = \left(\frac{f_h \cdot f_t \cdot C_{0v}}{P_E \cdot f_w} \right) \cdot 50 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 25,3 \cdot 10^3}{238,03 \cdot 1,5} \right) \cdot 50 = 3,68 \cdot 10^3$$

[39] (59)

Ze jmenovité životnosti je možné spočítat životnost [39].

$$L_{hv} = \frac{L_v \cdot 10^3}{v_t \cdot 60} = \frac{3,54 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{0,005 \cdot 60} = 340,83 \text{ h}$$

[39] (60)

Ještě je provedena kontrola statické únosnosti [39].

$$f_{sm} = \frac{M_R}{M_g + y_T \cdot a_t \cdot M_{ex}} = \frac{170}{1,34 + 0,25 \cdot 3 \cdot 3,041} = 133,03$$

[39] (61)

Z dopočítané životnosti se jeví, že je příliš nízká. Po vydělení hodnoty životnosti dobou tisku jednoho válce dostaneme počet tiskových cyklů.

$$N_v = \frac{L_{hv}}{t_{hf}} = \frac{334,2 \cdot 60}{5,98} = 3,42 \cdot 10^3$$

(62)

5.3 Sestavení extrudéru

Celý extrudér je složený ze tří sestav (Příloha 3). V následující části je popsáno jejich složení a funkce.

5.3.1 Píst

Odkazy náleží k (Příloha 4). Závitová tyč M8 4.8 (1) je pevně uchycena k pístu (2) pomocí matice M8 (3). Těsnění pístu zajišťuje manžeta N25 NBR80 24x32x4 ČSN 029269.1 Rubena (4)

5.3.2 Pohon pístu

Odkazy náleží k (příloha. 3). Jedná se o nesložitější celek celého extrudéru, který má za úkol přenos krouticího momentu na šroub. Za provozu extrudéru se neotáčí šroub, ale matice podobně jako u šroubového zvedáku. Mosazná matice M8 (13) je uložena v řemenici (3), (5). Řemenice je zajištěna proti axiálnímu posuvu dvěma ložisky 6203 (10).

Jsou použita kuličková ložiska i přes to, že zatížení je primárně axiální. Hlavním důvodem této volby je cena a možnost koupě krytovaného kuličkového ložiska. Axiální zatížení nejvýše 50 N je tak malé, že je ložisko schopné jej přenést.

Horní ložisko je vsazeno do krytu ložiska (7) a spodní ložisko je vsazeno do připraveného otvoru v podpoře motoru (6). Tyto dva díly jsou spojeny čtyřmi šrouby DIN 933 - M4 x 45 (24) a jim příslušnými podložkami (16) a maticemi (11).

K podpoře motoru je také připojen krokový motor s Přírubou NEMA 17 (2) pomocí šroubů (20) a matic (15). Na motoru je připojena řemenice (4), která je zajištěna pomocí matice M4 (11) a stavěcího šroubu ISO 4766 - M4 x 4 (22). Moment je přenášen pomocí řemene ISO 2596 MXL 640-025 - 6,35 (1). Řemen je možno napnout pomocí posunutí celého motoru po povolení šroubů (20).

Dále jsou k sestavě připojeny 2 koncové spínače OMRON (9) pomocí šroubů M2 (19) a podložek (14).

Podpora motoru (6) je ve spodní části připojena k upínáku trubky (8) pomocí pantu tvořeného dvěma lícovanými šrouby ISO 7379 - 8 x 16 (23) a jim příslušným podložkám (18) a maticím (12). Ve spodní části upínáku na trubku je šest průchozích děr pro šrouby M4 děr určených k připojení mechanismu k tělu extrudéru.

Šroubový spoj (21), (12), (17) v přední části mechanismu slouží k zajištění podpory motoru k upínáku na trubku. Po povolení šroubu je možno horní část extrudéru odklopit a vyměnit tiskovou náplň.

5.3.3 Tělo extrudéru

Odkazy náleží k (příloha 5). Největším dílcem této sestavy je Trubice vnější (4). Ve spodní části je dovnitř vsazena tryska (3), zatěsněna dvěma O kroužky PM 02 9281.1 MVQ Rubena - 35x2 (14). Drážka pro horní kroužek je z horní strany otevřená, protože má za úkol zatěsnit i vnitřní válec. Tryska je zajištěna k trubici pomocí tří šroubů M4 (10) a podložek (9), (7).

Ve výšce 42 mm nad tryskou je nasazena upínka na větrák (5) zajištěna dvěma šrouby M4 (12) a jim příslušnými maticemi (8) a podložkami (9). Chladicí ventilátor SUNON PMB2475PNB1-AY (1) je dotažen k upínce pomocí dvou šroubů M4 (13) podložek (9) a matice (8). Na výdech ventilátoru je napojen vzduchovod (6), nasazený a přilepený pomocí vteřinového lepidla.

Ve výšce 85 mm nad čelem trysky je nasazený a pomocí šroubů M4 dotažený jeden topný pás (2), druhý topný pás je přichycen ve výšce 320 mm nad čelem trysky.

5.3.4 Extrudér celek

Odkazy náleží k (příloha 2). Nejprve je píst (2) zašroubován do mechanismu pístu (1). Na horní konec pohybového závitu je našroubováno rameno vedení (6) a zajištěno maticí M8 (12). Obdobným způsobem jsou do ramena vedení napojeny dvě vodící tyče (5).

Mechanismus pístu včetně pístu je sesazen s tělem extrudéru (3) a zajištěn šesti šrouby M4 (13) a podložkami (9), (10).

Ve výšce 290 mm nad čelem trysky je na tělo extrudéru přichyceno uložení k vedení (7) pomocí dvou objímek uložení k vedení (8). Tyto tři součásti jsou staženy šroubovým spojením M4 (14), (10), (11).

V uložení k vedení jsou připravené díry pro šrouby M5, které slouží k upnutí extrudéru k vozíku lineárního vedení.

6 DISKUZE

V rámci práce se podařilo navrhnout extrudér, který je schopný zpracovat poměrně velké množství materiálu v krátkém čase.

Výměna náplně materiálu není zdoluhavá, ale je poměrně častá, protože doba tisku jedné náplně je $t_{hf} = 6$ min. Tento problém by vyřešilo prodloužení celého extrudéru. Z konstrukčního hlediska to je možné, jedná se pouze o změnu délek trubic vodících tyčí a hnacího závitu. Jedinou limitací je velikost pece, ve které se materiál přehřívá. Z toho důvodu byla zvolena taková délka náplně, tedy 450 mm.

Pokusy s měřením odporové síly nebyly zrovna nejpřesnější. Způsob odečítání výšky na pravítku vnesl do hodnot poměrně velkou chybu. Navíc pokusy nezaznamenaly kolísavý výtok, protože minutový interval byl příliš dlouhý. Bohužel jsem při pokusu měl plné ruce práce a nezvládl jsem hodnoty zaznamenávat v kratších intervalech. Výsledky z pokusů pramenící jsou spíše rámcové a dávají orientační hodnoty.

Důvod volby výpočtové volby odporové síly, i když z pokusů vychází kolem 35 N, je čistě konzervativní. Jedná se o experimentální extrudér, u kterého se předpokládá tisk z různých materiálů při různých teplotách. Pro podobné experimenty je tedy extrudér připravený. Je lepší, když přeskočí krok v motoru, než aby se poničil celý mechanismus.

Pohybová matice M8 byla zvolena z ekonomických důvodů. Původní plán užít lichoběžníkových závitů byl problematický. Dostatečně dlouhé závity průměru 8 mm a níže se téměř nedají objednat. Závit o průměru 10 mm je zase zbytečně předimenzovaný a znamenalo by to nárůst všech rozměrů.

Z hlediska bezpečnosti bylo možné užít i šroub M6, z hlediska převodového poměru byl tento závit nevhodný.

Možnost výroby dílů pomocí 3D tisku z ABS mi umožnila použít menší množství tvarově složitějších dílů. V rámci kusové výroby, kde se předpokládá tisk těchto dílů na tiskárně je návrh v pořádku. Pokud by se měl extruder dostat do sériové výroby je třeba některé díly upravit a zjednodušit, aby byla jejich výroba konvenčními technologiemi finančně únosná.

Tištěné díly jsou robustní a mohou působit předimenzovaně. Bohužel pro 3D tištěné součásti neexistují kvalitně změřené materiálové charakteristiky. Proto bylo při tvorbě postupováno konzervativně.

Celkové náklady na vývoj a sestavení extrudéru se podařilo udržet pod hodnotou 5000 Kč.

7 ZÁVĚR

Hlavní i všechny dílčí cíle práce byly splněny. Podařilo se navrhnout extrudér vhodný k experimentálním tiskům modelářské hlíny. Je dostatečně dimenzovaný, aby zvládl zpracovat i viskóznější materiály, než je hlína Monster Clay, nebo mohl pracovat při nižší teplotě, než byly prováděny pokusy. Díky tomu je vhodný pro experimentální tisky modelářské hlíny a s jeho pomocí je možné definovat optimální nastavení tiskových parametrů.

Proběhla analýza konstrukčních parametrů extrudéru a měření vlastností hlíny pro obě koncepční řešení. Výsledky ukázaly, že nízká tepelná vodivost značně omezuje přímý tisk z bloku materiálu. Tyto problémy se podařilo elegantně vyřešit pomocí druhého koncepčního návrhu, tisku pomocí pístu. Hlavní nevýhoda druhého koncepčního řešení je pomalá výměna materiálu. Tento problém je řešen vyměnitelnými kapslemi s předeřhřátým materiálem.

Na základě změřených hodnot bylo rozpracováno konstrukční řešení druhého zmíněného návrhu. Byla provedena pevnostní kontrola šroubového mechanismu a zvoleno vhodné uložení extrudéru k rámu tiskárny.

Byl vytvořen detailní 3D model extrudéru a zpracovaná výkresová dokumentace sestavení. Dále byly vytvořeny výrobní výkresy součástí, které je třeba tvořit konvenčními technologiemi.

Díly jsou vyrobeny a připraveny na sestavení.

V budoucnu je možné celý přístroj sestavit a vyzkoušet. Je možné provést sérii experimentů pro materiál nahřátý na různé teploty. A určit vhodné nastavení extrudéru pro kvalitní výtisky.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DVOŘÁK, Jan. *Technologické možnosti aditivních technologií* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-11-3]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek Ph.D.
- [2] ŠMALEC, Petr. *Konstrukční návrh extruderu pro 3D tisk kompozitních součástí* [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-11-3]. Dostupné z: https://primo.lib.vutbr.cz/primo-explore/fulldisplay?docid=420BUT_DSpace11012/66693&context=L&vid=420BUT&search_scope=Everything&tab=default_tab&lang=cs_CZ. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kočis Petr.
- [3] The Types Of 3D Printing. *All About 3d Printing* [online]. 2018 [cit. 2018-11-3]. Dostupné z: <http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/>
- [4] 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE. *ABC 3D: Nejlepší pro 3D tisk* [online]. Praha: ABC 3D, 2018 [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [5] 3D Printing Tips and Tech: Get to Know Those Acronyms. In: *Machine Design* [online]. USA: Machine Design, 2018 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/manufacturing-equipment/3d-printing-tips-and-tech-get-know-those-acronyms>
- [6] 3D filamenty. *Moderní 3D tiskárna* [online]. Moderní 3D tiskárna, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <http://www.moderni3dtiskarna.cz/3d-filamenty.html?jjj=1543052646488>
- [7] GREGURIĆ, Leo. Concrete 3D Printing – How it Works & The Applications. *All3DP* [online]. München Germany: All3DP, 2014 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application/>

- [8] LE, T., S. AUSTIN, S. LIM, R. BUSWELL, A. GIBB a T. THORPE. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* [online]. 2012, **45**(8), 1221-1232 [cit. 2018-12-01]. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [9] WIGGERS, Kyle. From pixels to plate, food has become 3D printing's delicious new frontier. *DIGITAL TRENDS* [online]. USA: DIGITAL TRENDS, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/3d-food-printers-how-they-could-change-what-you-eat/>
- [10] 3d tisk čokolády. *MakersLab* [online]. Horoměřice,: Open Innovations, 2016 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/tag/3d-tisk-cokolady/>
- [11] *SILIKONY s.r.o* [online]. Plzeň: SILIKONY, 2018 [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: www.silikonysro.cz
- [12] *Clay Bodies: General, Technical and Descriptive Information*. Wall Township, USA, © 2013-2018. Dostupné také z: http://www.chavant.com/files/pdf/clay_spec.pdf
- [13] *STAEDTLER Industrial-product* [online]. Nürnberg: STAEDTLER, 2018 [cit. 2018-11-4]. Dostupné z: <https://clay.industrial-products.com/de/>
- [14] *Technický list NSP*. Plzeň, 2018. Dostupné také z: https://www.silikonysro.cz/documents/NSP/NSP_Technicky_list.pdf
- [15] *TECHNISCHE INFORMATION Marsclay Light L4 8432 LC4*. Nürnberg, Deutschland, 2018. Dostupné také z: https://d22b46a36mhv7u.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/images/Industrial-Products/Clay/8432LC4_TI_EN_04-2018.pdf?1524483123
- [16] *TECHNISCHE INFORMATION Marsclay Medium 8432 M/8432MC*. Nürnberg, Deutschland, 2018. Dostupné také z: https://d22b46a36mhv7u.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/images/Industrial-Products/Clay/8432MC_Marsclay_Medium_Technische_Information_07-2017.pdf?1505986808

- [17] *TECHNISCHE INFORMATION SuperClay Hard 8433SHC*. Nürnberg, Deutschland, 2018. Dostupné také z: https://d22b46a36mhv7u.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/images/Industrial-Products/Clay/8433SHC_SuperClay_Hard_Technical_Information_07-2017.pdf?1505987246
- [18] *TECHNISCHE INFORMATION SuperClay Medium 8433SMC*. Nürnberg, Deutschland, 2018. Dostupné také z: https://d22b46a36mhv7u.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/images/Industrial-Products/Clay/8433SMC_SuperClay_Medium_Technical_Information_07-2017.pdf?1505987231
- [19] ASTM D 937 – 97. *Standard Test Method for Cone Penetration of Petrolatum*. 2002. USA: The institut of petroleum, 2002.
- [20] *TECHNISCHE INFORMATION TecClay 8433TMC*. Nürnberg, Deutschland, 2018. Dostupné také z: https://d22b46a36mhv7u.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/images/Industrial-Products/Clay/8433TMC_TecClay_Technical_Information_07-2017.pdf?1505987272
- [21] *SDS MMOBC- Monster Makers Monster Clay*. Cleveland, Ohio, 2018. Dostupné také z: <https://www.monstermakers.com/content/pdfs/SDS%20MMOBC-%20Monster%20Makers%20Monster%20Clay.pdf>
- [22] *Technický list Monster Clay*. Plzeň, 2018. Dostupné také z: https://www.silikonysro.cz/documents/Monster-Clay/Monster-Clay_Technicky_list.pdf
- [23] HERSCHEL, Winslow. UNITED STATES. *Standardization of the Saybolt universal viscosimeter*. 2. U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Standards: --U.S. Govt. Print. Off., 1918. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015086545665>
- [24] Vosk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2018 [cit. 2018-11-3]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vosk&oldid=15393066>
- [25] 3D Printed Wax. *Sculpteo* [online]. Villejuif, France: Sculpteo, © 2009-2018 [cit. 2018-11-4]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/3d-printed-wax/>

- [26] 3D tisk v kostce. *MATERIAL PRO 3D* [online]. Brno: Solidify 3D, 2018 [cit. 2018-11-4]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [27] Jíl. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2018 [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=J%C3%ADl&oldid=15397696>
- [28] WASP [online]. Massa Lombarda, Italy: WASP, 2018 [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.3dwasp.com/>
- [29] REINHARDT, Dagmar a Rob SAUNDERS, Jane BURRY, ed. *Robotic fabrication in architecture, art and design 2016*. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-26376-2.
- [30] LOCKER, Anatol. 2018 Ceramic 3D Printer Guide – All About Ceramic 3D Printing. *All3DP* [online]. 2018 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-ceramic-3d-printer/>
- [31] WILLMANN, Jan, Philippe BLOCK, Marco HUTTER a Kendra BYRNE, Tim SCHORK, ed. *Robotic fabrication in architecture, art and design 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2019. ISBN 978-3-319-92293-5.
- [32] BEREZKIN, Anatoly. StoneFlower: Ceramic 3D Printing KIT. In: *Kickstarter* [online]. Kickstarter, 2018 [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/1771960444/stoneflower-ceramic-3d-printing-kit>
- [33] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2003, 276 s. : il. ISBN 80-7196-264-3.
- [34] ÇENGEL, Yunus A a Michael A BOLES. *Thermodynamics: an engineering approach*. 3rd ed. Boston]: McGraw-Hill, 2001, 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 0-07-240287-3.
- [35] Hodnoty vody a vzduchu pro výpočet přestupu tepla. *Tzbinfo: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov* [online]. Praha: topinfo, 2019 [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla#>

- [36] *Topné pásy*. Polička, 2017. Dostupné také z: http://easytherm.cz/index.php?topne_pasy
- [37] *N1040 a N1040T*. Polička, 2017. Dostupné také z: <https://www.easytherm.cz/index.php?id=213,196,0,0,1,0>
- [38] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTÍUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [39] *Lineární vedení s oběhovými kuličkami: Montáž*. Popůvky u Brna, 2009. Dostupné také z: <https://www.teatechnik.cz/obeh-kulickami-hg/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

D_{tr}	průměr trysky
v_t	rychlost tisku
s_v	šířka tisknuté vrstvy
ρ	hustota hlíny
m	hmotnost jednoho balení hlíny
d_h	průměr hliněného válce
h_v, h_{vter}, h_f	výška vrstvy
S_v	průřez tisknuté vrstvy
Q_v	objemový průtok extrudérem
Q_m	hmotností průtok
S_h	průřez hliněného válce
h_h, h_{hf}	výšky hliněného válce
v_h	rychlost posuvu válce
t_h, t_{hf}	čas tisku
c_{fv}	přídavek na ořezání
O_s	obvod skutečného válce
d_{hs}	průměr skutečného hliněného válce
s	šířka řezu
m_h, m_v	hmotnost vzorku hlíny, vody
t_{h1}, t_{v1}	teplota vzorku hlíny, vody počáteční
t_{h2}, t_{v2}	teploty vzorku hlíny, vody koncová
c_h, c_v	měrné tepelné kapacity hlíny, vody
t_0, t_{hk}	teploty hlíny pracovní
Q_h	tepelný tok teoretický

$t_1, t_2, t_3, T_1, T_2, T_3$	průměrné teploty topných pásů válce a okolí
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	emisivita topných pásů, válce
h_p	výška topného pásu
d_1, d_2	vnější průměr pásu, válce
σ_0	Stefan-boltzmanova konstanta
l_0	počáteční délka válce
ν_v	kinematická viskozita vzduchu
g	gravitační zrychlení
c, m, n	konstanty pro válec a laminární proudění
λ	tepelná vodivost vzduchu
P_r	Prandtlovo číslo
S_1, S_2	povrch topných pásů, povrch válce
Q_z	tepelný tok zářením
γ_1, γ_2	součinitele do grasthofova čísla
Gr_1, Gr_2	Grasthofova čísla pro pásy, válec
Nu_1, Nu_2	Nuseltova čísla pro pásy, válec
α_1, α_2	součinitele přestupu tepla čísla pro pásy, válec a vzduch
Q_k	tepelný tok prouděním
Q_l, Q_c	tepelný tok ztrátový, celkový
d_v	vnější průměr trubky těla extruderu
l_{s1}, l_{s2}	délka spojovací, upevňovací závitové tyče
h_{3a}, h_{3b}	výška upnutí topného pásu
$t_{r2, 3, 4, 5, 6, 7}$	teplota topných spirál při jednotlivých rozloženích
$m_{záv2, 3, 4, 5, 6, 7}$	hmotnost závaží při jednotlivých rozloženích
$m_{nád}$	hmotnost nádoby
$h_{dop2, 3, 4, 5, 6, 7}$	dopočítaná výška válce hlíny při jednotlivých rozloženích
$t_{dop2, 3, 4, 5, 6, 7}$	čas dopočítaný při jednotlivých zatíženích
$a_{dop2, 3, 4, 5, 6, 7}$	dopočítané zrychlení při jednotlivých zatíženích

$V_{dop2, 3, 4, 5, 6, 7}$	dopočítaná rychlost při jednotlivých zatíženích
$m_{dop2, 3, 4, 5, 6, 7}$	dopočítaná zatěžovací hmotnost při jednotlivých rozloženích
$F_{02, 3, 4, 5, 6, 7}$	odporová síla při zatížení při jednotlivých zatíženích
P_h	rozteč pohybového šroubu
f_z	součinitel smykového tření ocel-mosaz
β	úhel boku profilu
d_z, d_{z2}, d_{z3}	velký, střední, malý průměr šroubu
d_{z2}	střední průměr závitu
d_{z3}	malý průměr závitu
D_{z1}	malý průměr závitu matice
h_m	výška matice
n_z	počet závitů v matici
l_z	délka šroubu
S_{z3}	malý průřez šroubu
E_z	modul pružnosti oceli
Re_z	mez kluzu oceli
a_k	vůle ve šroubu
M_T	moment potřebný na otáčení matice
N_m, N_M	otáčky matice, motoru
N_{Mmin}	minimální otáčky motoru
i	převodový poměr
z_1, z_2	počet zubů na pastorku, kole
P_M	výkon motoru
M_{Mot}	točivý moment motoru
l_z	délka šroubu
S_{z3}	Průřez šroubu malý
I_z	kvadratický moment šroubu
λ_1, λ	kritická štíhlost, štíhlost

F_{krit}	kritická síla
k_{vz}	bezpečnost vůči vzpěru
m_{ex}	hmotnost celého extruderu
$H_v=$	celková délka vozíku
x_T, y_T	souřadnice těžiště
C_{ov}	dynamické únosnost vozíku
M_R, M_P, M_y	statické momenty
L_u	vzdálenost od dosedací plochy lineárního vedení k trubici
$f_h, f_t, f_w = 1$	součinitelé
L_v, L_{hv}	jmenovitá životnost, životnost
f_{sm}	bezpečnost vůči statické unosnosti
N_v	počet výměn válce
a_z	součinitel vazeb vetknutí vetknutí

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	Schéma principu FDM tiskárny na plast. [5]	16
obr. 2-2	Schéma tisku betonu. [8].....	17
obr. 2-3	Proces výroby odlitku z tištěné součásti [25].....	22
obr. 2-4	Schéma mechanického tlakového extruderu od Anatola Berezkina. [32]	23
obr. 4-1	Závislost výšky vrstvy na hmotnostním toku při $v_t = 50 \text{ mm s}^{-1}$	29
obr. 4-2	Závislost hmotnostního toku na rychlosti při $h_v = 3 \text{ mm}$	29
obr. 4-3	Sestavení formy na hliněné válce	32
obr. 4-4	Ukázka kalorimetru po ukončení pokusu	32
obr. 4-5	Závislost chladnutí středu hlíny na čase	33
obr. 4-6	Rozložení pro výpočet ztrát.....	34
obr. 4-7	Závislost topného výkonu na rychlosti tisku pro $h = 3 \text{ mm}$	37
obr. 4-8	Schéma topného pásu [36]	38
obr. 4-9	Schéma zapojení regulátoru [37].....	39
obr. 4-10	Nákres aparatury	40
obr. 4-11	Náčrt trysky.....	41
obr. 4-12	rozložení topných pásů.....	42
obr. 4-13	Závislost výšky válce na čase	44
obr. 4-14	Náčrt silového působení pro vyhodnocení experimentu	45
obr. 4-15	Tok hlíny při rozložení 3	46
obr. 4-16	Závislost výšky válce na čase rozložení 5,6.....	49
obr. 4-17	Vytečená hlína hlíny při rozložení 5 a 6	50
obr. 4-18	Závislosti rychlosti na odporové síle pro rozložení 3,5,6.....	50
obr. 4-19	Zbytek válce vytažený z extruderu po ukončení pokusu 4	51
obr. 4-20	Schéma návrhu tisku z taveniny	53
obr. 4-21	Závislost výšky válce na čase 7.....	55
obr. 5-1	Konstrukční řešení extruderu.....	57
obr. 5-2	Schéma zatížení vozíku tíhovou silou.....	62

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1 Vlastnosti hlíny Chavant Autostyle.....	18
tab. 2-2 Srovnání základních vlastností hlín Chavant NSP Medium a Soft [14]	19
tab. 2-3 Srovnání základních vlastností hlín Marsclay Medium a Light [15] [16]	19
tab. 2-4 Srovnání základních vlastností hlín SuperClay Medium a Hard [17] [18].....	20
tab. 2-5 Základní vlastností hlíny TechClay [20]	20
tab. 2-6 Základní vlastností hlíny Monster Clay [21]	20
tab. 4-1 Hodnoty měření.....	33
tab. 4-2 Výstupy [37]	38
tab. 4-3 Výsledky pokusu při rozložení 3, 4, 5	44
tab. 4-4 Dopočítané hodnoty rozložení 2	46
tab. 4-5 Dopočítané hodnoty rozložení 3	47
tab. 4-6 Dopočítané hodnoty rozložení 4	47
tab. 4-7 Výsledky pokusu pro rozložení 5	48
tab. 4-8 Dopočítané hodnoty rozložení 5	49
tab. 4-9 Dopočítané hodnoty rozložení 6	49
tab. 4-10 Výsledky pokusu pro rozložení 71	54
tab. 4-11 Výsledky pokusu pro rozložení 72	54
tab. 4-12 Dopočítané hodnoty rozložení 71.....	55
tab. 4-13 Dopočítané hodnoty rozložení 72.....	55

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha. 1	Výpočtový dokument	
Příloha. 2	Extruder hlíny	00/00-A1
Příloha. 3	Pohon pístu	01/00-A2
Příloha. 4	Píst	02/00-A4
Příloha. 5	Tělo extruderu	03/00-A1
Příloha. 6	Trubice Vnitřní	00/01-A4
Příloha. 7	Tryska	03/01-A3
Příloha. 8	Trubice vnější	03/02-A4